

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ DISPERZÍ V OPTICKÉM
VLÁKNĚ**

MEASUREMENT AND EVALUATION OF DISPERSIONS IN OPTICAL FIBRE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Očenášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Vojtěch, Ph.D.

BRNO 2017



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

Student: Jan Očenášek

ID: 154821

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Měření a vyhodnocení disperzí v optickém vlákne

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je detailní teoretický rozbor problematiky disperzí v optickém vlákne a možností jejich měření. Na základě teoretického rozboru bude proveden návrh zapojení pro dlouhodobé měření disperzí a následné vyhodnocení. Kromě samotného návrhu měření bude zkoumán i vliv fyzického namáhání a změn okolních podmínek vlákna na disperze.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] Ťupa, M.; FILKA, M.; Dostál, O. Polarizační vidová disperze - PMD. Elektrevue - Internetový časopis (<http://www.elektrevue.cz>), 2012, roč. 2012, č. 24, s. 1-5. ISSN: 1213- 1539

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Josef Vojtěch, Ph.D.

Konzultant: Ing. Petr Münster, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o měření a vyhodnocení disperzí v optickém vlákne. Úvod práce je zaměřen na popis principu optického vlákna a optického prostředí. Další část práce je věnována detailnímu popisu polarizační vidové disperze - PMD, včetně příčin vzniku, které jsou rozděleny na vnitřní a vnější. Díky těmto vlivům vzniká diferenční skupinové zpoždění DGD, které má za následek časové zpoždění jednotlivých polarizačních vidů mezi sebou a dochází tak k omezení rychlosti přenosu. Polarizační vidová disperze je jedním z nejvíce limitujících faktorů pro realizaci vysokorychlostních optických přenosů, proto jsou v další části práce popsány možnosti měření a kompenzace PMD efektu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polarizační vidová disperze, optické vlákno, kompenzace PMD, měření PMD, Stokesův prostor, Jonesův prostor, optické prostředí, zpoždění DGD

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with measurement and evaluation of the dispersion in the optical fiber. Introduction of the work is focused on the description of the principle of optical fiber and optical environment. Another part is devoted to a detailed description of polarization mode dispersion - PMD, including the causes of which are divided into internal and external. Because of these impacts of the differential group delay DGD, which results in time delay of each polarization modes to each other and hence to reduce the transmission speed. Polarization mode dispersion is one of the most limiting factors for the realization of high-speed optical transmission, so in the next section describes the measurement and compensation of PMD effect.

KEYWORDS

Polarization mode dispersion, optic fiber, compensation PMD, measuring PMD, Stoke's space, Jones's space, optical environment, Differential Group Delay

OČENÁŠEK, Jan *Měření a vyhodnocení disperzí v optickém vlákne*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 58 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Münster, Phd.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měření a vyhodnocení disperzí v optickém vlákně“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Münsterovy, Phd. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské pr byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
(podpis autora)

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 10 |
| 1 Optická vlákna | 11 |
| 1.1 Princip optického vlákna | 11 |
| 1.2 Optické prostředí | 12 |
| 1.3 Lineární optické jevy | 13 |
| 1.3.1 Útlum | 13 |
| 1.3.2 Lineární rozptyl světla | 14 |
| 1.3.3 Disperze | 15 |
| 1.4 Typy optických vláken | 17 |
| 1.4.1 Jednovidová optická vlákna | 17 |
| 1.4.2 Mnohovidová optická vlákna | 18 |
| 1.5 Telekomunikační okna | 19 |
| 1.6 Dělení optických vláken podle ITU-T | 20 |
| 2 Polarizační vidová disperze - PMD | 21 |
| 2.1 Vznik PMD | 21 |
| 2.2 Matematické vyjádření polarizační vidové disperze | 22 |
| 2.2.1 Stokesův prostor | 22 |
| 2.2.2 Jonesův prostor | 23 |
| 2.3 Limitní parametry PMD | 24 |
| 2.3.1 Závislost PMD na délce optického vlákna | 26 |
| 2.3.2 Vlivy na vznik PMD | 28 |
| 3 Metody měření PMD | 30 |
| 3.1 Metoda TINTY (tradiční interferometrická metoda) | 30 |
| 3.2 Metoda GINTY (všeobecná interferometrická metoda) | 31 |
| 3.3 Metoda skenování vlnové délky (s fixním analyzátozem) | 32 |
| 3.4 Metoda P-OTDR | 33 |
| 3.4.1 Metoda analýzy SOP | 34 |
| 3.4.2 Metoda analýzy DOP | 34 |
| 3.5 Metoda polarimetrická | 35 |
| 4 Kompenzace PMD | 36 |
| 4.1 Optická metoda kompenzace | 36 |
| 4.2 Optoelektronická metoda kompenzace | 37 |
| 4.3 Elektronická metoda kompenzace | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Praktická část měření PMD | 39 |
| 5.1 | Měřicí soustava | 39 |
| 5.2 | Zápis výsledku měření do CSV souborů | 40 |
| 5.3 | Měření reálné trasy Technická 12-Campus Bohunice | 40 |
| 5.4 | Výsledky automatizovaného měření reálné trasy | 40 |
| 5.4.1 | První scénář | 41 |
| 5.4.2 | Druhý scénář | 42 |
| 5.4.3 | Třetí scénář | 44 |
| 5.4.4 | Zhodnocení dlouhodobého měření | 44 |
| 5.5 | Návrh scénářů mechanického namáhání optického vlákna | 45 |
| 5.5.1 | Klidový stav vlákna | 46 |
| 5.5.2 | První scénář | 46 |
| 5.5.3 | Druhý scénář | 47 |
| 5.5.4 | Třetí scénář | 48 |
| 5.5.5 | Zhodnocení měření za fyzického namáhání | 49 |
| 6 | Závěr | 50 |
| | Literatura | 52 |
| | Seznam symbolů, veličin a zkratk | 54 |
| | Seznam příloh | 57 |
| A | Obsah přiloženého DVD | 58 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Optické vlákno | 11 |
| 1.2 | Lineární optické prostředí | 12 |
| 1.3 | Nelineární optické prostředí | 13 |
| 1.4 | Vliv disperze na rozšíření impulzů v optických vláknech | 15 |
| 1.5 | Princip vidové disperze | 16 |
| 1.6 | Princip PMD | 17 |
| 1.7 | Jednovidové optické vlákno | 18 |
| 1.8 | Mnohovidové optické vlákno se skokovou a gradientní změnou indexu lomu | 18 |
| 1.9 | Závislost útlumu na vlnové délce a vyznačená telekomunikační okna . | 19 |
| 2.1 | Model polarizačních rovin | 21 |
| 2.2 | Poincarého koule | 23 |
| 2.3 | Maximální rozšíření impulsu signálového prvku | 25 |
| 2.4 | Maxwellian distribuční funkce | 26 |
| 2.5 | Prostorový vývoj polarizace | 27 |
| 2.6 | Závislost PMD na délce kabelu | 28 |
| 3.1 | Uspořádání zapojení metody TINTY | 31 |
| 3.2 | Uspořádání zapojení metody GINTY | 32 |
| 3.3 | Metoda skenování vlnové délky | 33 |
| 3.4 | Blokové schéma analýzy SOP | 34 |
| 3.5 | Blokové schéma analýzy DOP | 35 |
| 4.1 | Princip optické kompenzace | 36 |
| 4.2 | Princip optoelektronické metody | 37 |
| 4.3 | Blokové schéma elektronické PMD kompenzace | 38 |
| 5.1 | Měřicí systém EXFO FTB-200 [15] | 39 |
| 5.2 | Schéma trasy Technická 12-Campus Bohunice | 41 |
| 5.3 | Graf PMD a teploty v závislosti na čase měření pro první scénář . . | 42 |
| 5.4 | Graf PMD a teploty v závislosti na čase měření pro druhý scénář . . | 43 |
| 5.5 | Graf PMD a teploty v závislosti na čase měření pro třetí scénář . . . | 45 |
| 5.6 | Schéma měřicí soustavy | 46 |
| 5.7 | Překroucení optického vlákna | 47 |
| 5.8 | Ohyb vlákna | 48 |
| 5.9 | Tlak na optické vlákno | 49 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Limitní hodnoty PMD pro různé rychlosti přenosu | 25 |
| 5.1 | Tolerance PMD pro systém EXFO FTB-200 | 40 |
| 5.2 | Naměřené hodnoty PMD pro první scénář | 41 |
| 5.3 | Naměřené hodnoty PMD pro druhý scénář | 43 |
| 5.4 | Naměřené hodnoty PMD pro třetí scénář | 44 |
| 5.5 | Naměřené hodnoty PMD pro klidový stav vlákna | 46 |
| 5.6 | Naměřené hodnoty PMD pro překroucení vlákna | 47 |
| 5.7 | Naměřené hodnoty PMD pro ohyb vlákna | 48 |
| 5.8 | Naměřené hodnoty PMD pro tlak na vlákno | 48 |

ÚVOD

Polarizační vidová disperze patří v posledních letech k jedním z nejvíce limitujícím parametrům pro vysokorychlostní přenos přes optické kabely. Jelikož je PMD náhodná veličina a její hodnota závisí na mnoha okolních faktorech, jako např. teplota nebo vibrace a mechanické namáhání, je v praktické části provedeno měření reálné trasy optického kabelu a jsou navrženy scénáře pro další měření změny hodnoty PMD při mechanickém namáhání.

V úvodní části této práce se zabýváme základním popisem a principem optického vlákna. Dále je popsáno optické prostředí lineární a nelineární, včetně optických jevů, které v těchto prostředích vznikají. Následuje popis typů optických vláken od jednovidových až po mnohavidová. Jelikož pro přenos optického signálu v optickém vlákne používáme tzv. telekomunikační okna, tak v poslední části jsou tato telekomunikační okna popsána.

Druhá kapitola se věnuje popisu polarizační vidové disperze jako takové. Je zde podrobně popsán vznik tohoto zkreslení včetně vnějších a vnitřních vlivů, které mají na toto zkreslení největší vliv. Další částí je popis Stokesova a Jonesova prostoru, které nám reprezentují matematické vyjádření polarizační vidové disperze. Dále zde máme obsaženy limitní parametry PMD a v závěrečné části je uveden popis závislosti PMD na délce optického vlákna.

Kapitola třetí je zaměřena na metody měření polarizační vidové disperze. Jednotlivé metody jsou podrobně popsány jak slovně tak blokovými schématy. V popisu metod můžeme nalézt jejich výhody či nevýhody a možnost jejich využití.

Čtvrtá kapitola obsahuje přehled možností kompenzace PMD, které jsou nasazovány pro snížení vlivu PMD bez zasažení do optické trasy. Jednotlivé metody jsou jako v předchozím případě ilustrovány na blokových schématech.

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na jednotlivé scénáře jak pro měření reálné trasy Technická - Campus Bohunice, tak i pro měření PMD při mechanickém namáhání optického vlákna. Můžeme zde najít popis měřicí soustavy se základními informacemi, jako je např. zápis do souborů a tolerance PMD pro tuto měřicí soustavu. Pro reálnou trasu jsou zde pro jednotlivé scénáře uvedeny naměřené hodnoty PMD a vyneseny do grafu, kde je obsažena i teplota při tomto měření. Všechny scénáře dlouhodobého měření jsou poté zhodnoceny z hlediska limitních hodnot PMD. Poslední část této práce se věnuje, jak již bylo výše zmíněno, měření hodnot PMD při fyzickém namáhání. Pro toto měření jsou vytvořeny opět tři scénáře pro jednotlivé druhy možného namáhání. Všechny hodnoty jsou přehledně zapsány v příslušných tabulkách a poté zhodnoceny z hlediska vlivu tohoto namáhání na hodnotu PMD.

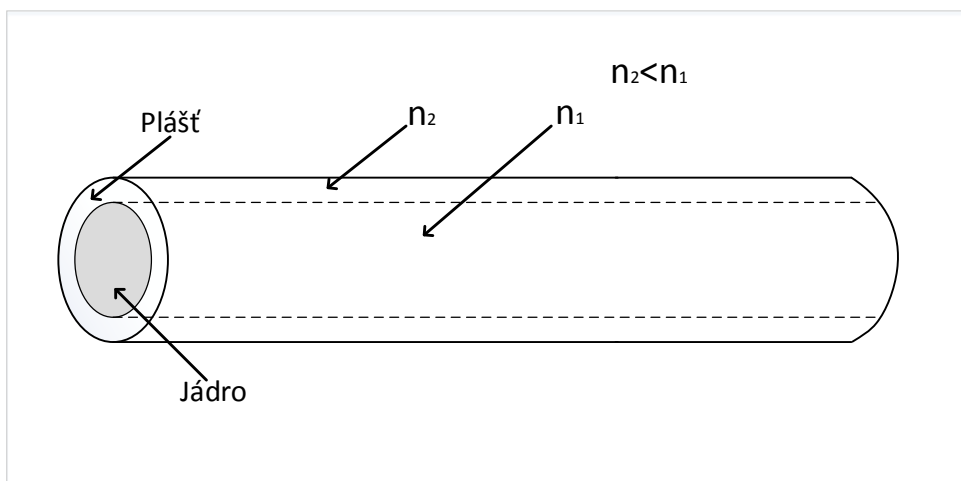
1 OPTICKÁ VLÁKNA

V dnešní době můžeme říci, že optická vlákna již zcela nahrazují nebo přinejmenším vytlačují klasické kovové vodiče. Jedním z hlavních důvodů je především rychlost přenosu dat přes tyto vlákna, větší odolnost vůči elektromagnetickému rušení, menší pravděpodobnost odposlechu a v neposlední řadě i budoucnost přenosu dat přes optická vlákna, kde již dnes se testuje 100G model sítě.

Optické vlákno jako takové je vlastně dielektrický vlnovod, ve kterém se šíří elektromagnetické vlnění. Vláknom se přenáší digitální informace, které se skládají z bitů ve formě jedničky, kdy se signál šíří, resp. nuly kdy se signál nešíří. V těchto bitech je zakódována informace.

1.1 Princip optického vlákna

Přenos dat v optickém vlákne se děje šířením světla v optickém vlnovodu. Přitom využívá totálního odrazu paprsku od vnitřních stěn. Odráží se proto, že paprsek přichází na rozhraní dvou prostředí a pokud je splněna podmínka, že jedno prostředí má menší index lomu jako druhé. Pokud tedy index lomu jádra je větší než index lomu pláště dochází k totálnímu odrazu (Snellův zákon).[1] Optické vlákno vidíme na Obr.1.1.



Obr. 1.1: Optické vlákno

Samozřejmě pro přenos dat potřebujeme kromě optické vlákna i jiné komponenty. Na jedné straně musí být signál nějakým způsobem vygenerován a po průchodu

optickým vláknem musí být zase komponenta která signál správně detekuje. Pro vysílání se nejčastěji využívají např. DFB lasery nebo FP lasery. Jako detektor může být použit např. fotodioda nebo fototranzistor.[1]

1.2 Optické prostředí

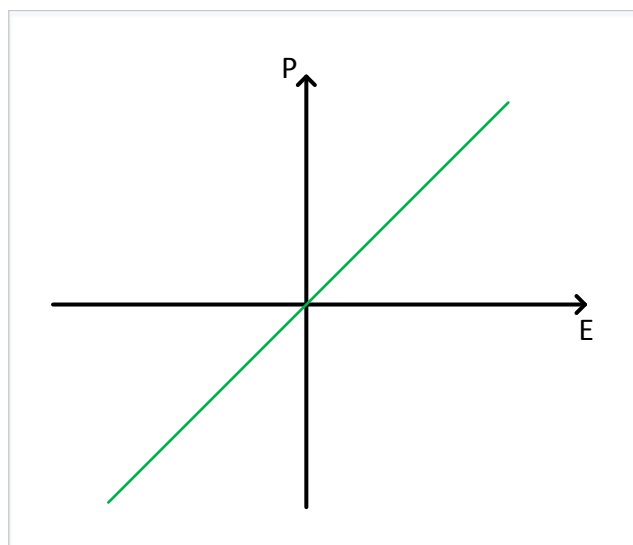
Optické prostředí můžeme rozdělit na prostředí lineární a nelineární. Rozdíl mezi lineárním a nelineárním prostředím je ten, že zatímco v lineárním prostředí platí princip superpozice (paprsky se neovlivňují), v nelineárním prostředí tento princip neplatí. V lineárním optickém prostředí zkoumáme jevy jako jsou útlum a disperze. V nelineárním prostředí jsou to jevy druhého a třetího řádu a nelineární rozptyl. Z toho důvodu, že téma semestrálního projektu se zabývá především polarizační vidovou disperzí, tedy jevem v lineárním optickém prostředí, nelineární si popíšeme jen stručně.

Lineární optické prostředí

Je to prostředí, ve kterém pokud není použito příliš velké elektrické pole, tak je polarizace přímo úměrná intenzitě elektrického pole:[2]

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (1.1)$$

kde P je elektrická polarizace, ϵ je permitivita vakua, χ je dielektrická susceptibilita prostředí a E je intenzita elektrického pole.



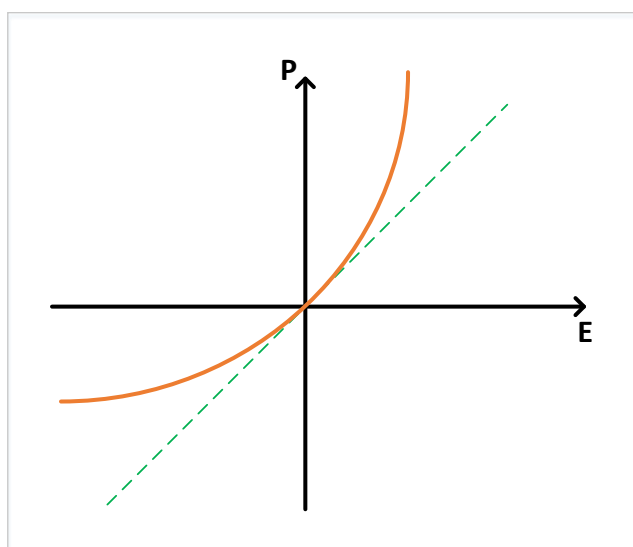
Obr. 1.2: Lineární optické prostředí

Nelineární optické prostředí

Je to prostředí ve kterém neplatí princip superpozice, tedy elektrická polarizace atomů není vždy úměrná intenzitě elektrického pole. Pokud elektrony jsou v přítomnosti silného elektrického pole E , tak odezva není lineární. Celkovou elektrickou polarizaci můžeme vyjádřit ve formě:[3]

$$\vec{P} = \epsilon_0(\chi^1 \vec{E} + \chi^2 \vec{E} \vec{E} + \chi^3 \vec{E} \vec{E} \vec{E}) \quad (1.2)$$

kde χ^1 představuje lineární susceptibilitu, vyšší řády χ^2 a χ^3 označujeme jako kvadratickou susceptibilitu.



Obr. 1.3: Nelineární optické prostředí

1.3 Lineární optické jevy

Jak již bylo zmíněno do negativních jevů v lineárním prostředí patří především útlum, včetně rozptylu a absorpce, dále je negativním jevem disperze, kam můžeme zařadit materiálovou, vlnovou, vidovou a především pak polarizační vidovou, která pro naši práci bude stěžejní.

1.3.1 Útlum

Útlum je v podstatě proces, kdy se při šíření signálu optickým vláknem ztrácí energie tohoto signálu. Pokud nepoužijeme různé opakovací či generátory, můžeme říci, že

signál úplně zanikne. Z tohoto důvodu se snažíme dosáhnout co nejnižší hodnoty útlumu, aby přenášený signál dosahoval co nejdelší možné trasy přenosu. Útlum, který se udává v dB/km můžeme definovat jako poměr výstupního světelného výkonu P_2 a vstupního výkonu P_1 pro danou vlnovou délku λ podle vztahu:[4]

$$A = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad (1.3)$$

Útlum závisí na absorpci a rozptylu v jádře i plášti optického vlákna a je vidově závislý. Tzn. vyšší vid má větší útlum, než vid nižší, proto má také jednovidové vlákno nižší útlum než vlákno mnohovidové. Ztráty vznikají také náhodnými fluktuacemi rozměrů vlákna a jeho tepelným a mechanickým namáháním.

Měrný útlum vlákna α představuje útlum na 1 km délky, dle vztahu:[4]

$$\alpha = \frac{A}{L} \quad (1.4)$$

1.3.2 Lineární rozptyl světla

Tento proces je typ útlumu přenášeného paprsku, který se nadále nešíří v jádře vlákna, ale je vyzařován do prostředí. Lineární rozptyl můžeme rozdělit do dvou typů a to Rayleighův a Mieho rozptyl.

Rayleighův rozptyl

Můžeme ho definovat jako hlavní typ lineárního rozptylu. Je způsoben tepelnými kmity krystalické mřížky. Je způsoben malými částicemi v materiálu optického vlákna. Rozměry těchto částic jsou menší než vlnová délka přenášeného signálu. Projevuje se jako přídavný útlum vlákna a představuje přibližně 96% útlumu optického vlákna. Rayleighův rozptyl je přímo úměrný osmé mocnině indexu lomu a klesá se čtvrtou mocninou vlnové délky.

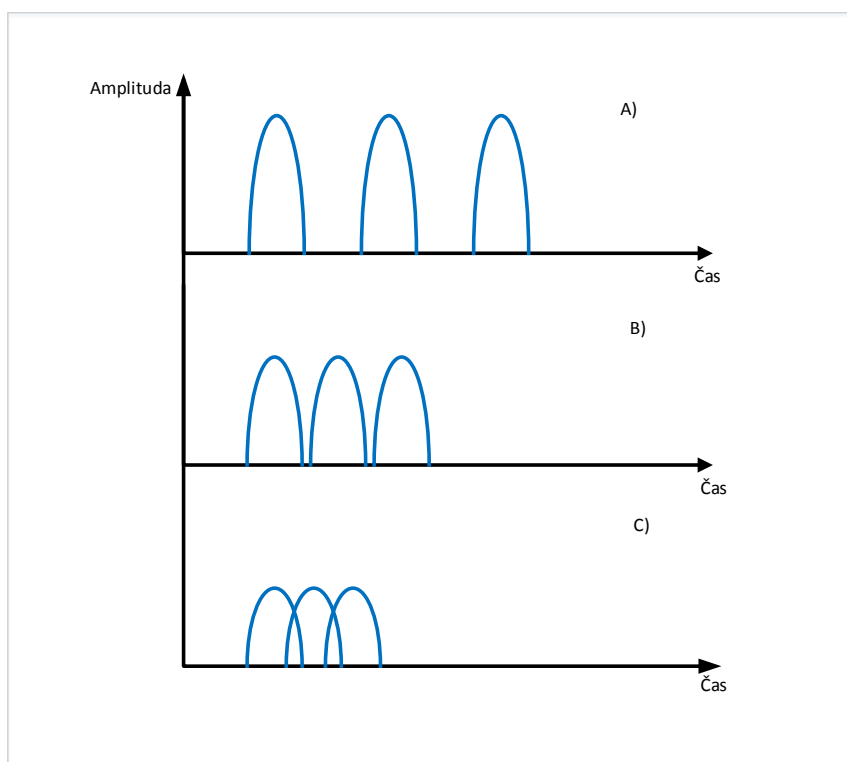
Rayleighův rozptyl nejde zcela eliminovat, můžeme jej však redukovat zlepšením technologie výroby optických vláken a posunem pracovní frekvence do IR oblasti (provoz na vyšších vlnových délkách).[5]

Mieův rozptyl

Tento rozptyl je způsoben malými nehomogenitami, jejichž rozměry jsou srovnatelné nebo i větší jako je vlnová délka přenášeného signálu. Může být způsoben nedokonalostmi vláken jako je třeba porucha rozhraní jádro-plášť, změnami průměru jádra apod. Rozptyl se významně zvyšuje, pokud geometrické nepravidelnosti překročí 1/10 vlnové délky světla. Tyto ztráty lze částečně eliminovat zdokonalením výrobního procesu vlákna a odstraněním nerovnoměrností při výrobě.[5]

1.3.3 Disperze

Disperze je jeden z hlavních faktorů, které ovlivňují přenos dat v optických sítích. Má za následek zkreslení signálu a závisí na šířce frekvenčního pásma. Čím je toto pásmo menší, tím je menší i disperze. Ke zvětšení disperze dochází při rozdílné vlnové délce světla. Můžeme ji tedy definovat jako rozdíl šířky impulzu v polovině výšky na začátku a na konci vlákna. Na výstupu optického vlákna se impulzy můžou začít překrývat. Čím se zvyšuje vzdálenost a přenosová rychlost tím se i zvyšuje vliv disperze na přenášený signál. Na Obr.1.4. je vidíme vliv disperze na signál v optickém vláknu. Disperzi můžeme rozdělit na materiálovou, vlnovodovou, vidovou a polarizační vidovou. [1]



Obr. 1.4: Vliv disperze na rozšíření impulzů v optických vláknech

Materiálová disperze

Materiálová disperze je způsobena závislostí indexu lomu materiálu vlákna na vlnové délce záření. Různé vlnové délky se přenáší různou rychlostí v optickém materiálu. Různé vlnové délky světelného impulzu, které vstoupí do vlákna opustí vlákno dohromady, ale v různých časech.

Materiálová disperze ovlivňuje také dobu průchodu jednotlivých vidů, což má částečný vliv na disperzi vidovou. Udává se v hodnotách časového rozptylu šíření

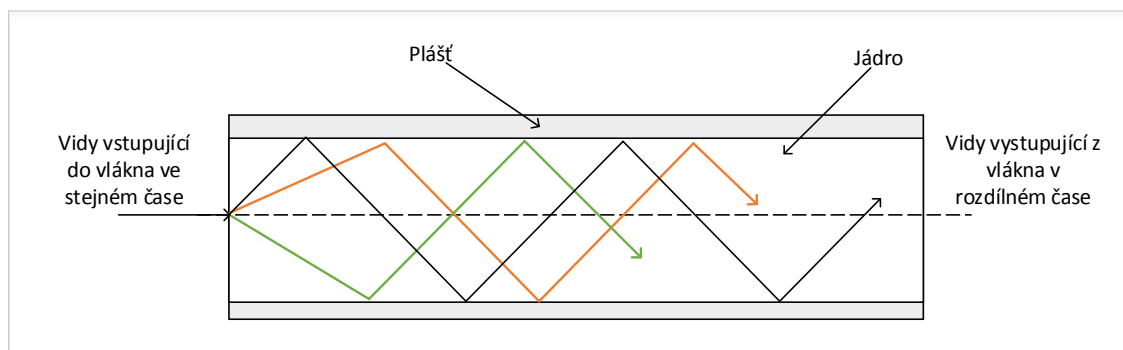
daného vidu na 1 km délky vlákna a 1 nm šířky spektrální čáry [nm.s/km]. Nejmenších ztrát materiálovou disperzí je dosahováno pro křemenné sklo v oblasti 1,27 m.[6]

Vlnovodová disperze

S vlnovodovou disperzí se můžeme setkat především v jednovidových optických vláknech, v mnohovidových vláknech tuto disperzi můžeme zanedbat, neboť většina vidů je mimo mezní vlnovou délku. Příčina vlnovodové disperze je ta, že konstanta šíření je rozdílná pro každý vid což způsobuje změnu kmitočtu a to má za následek změnu rychlosti šíření. Tato disperze je způsobena tím, že část světelného paprsku se šíří v plášti vlákna, kdežto větší část tohoto paprsku se šíří jádrem optického vlákna.[1]

Vidová disperze

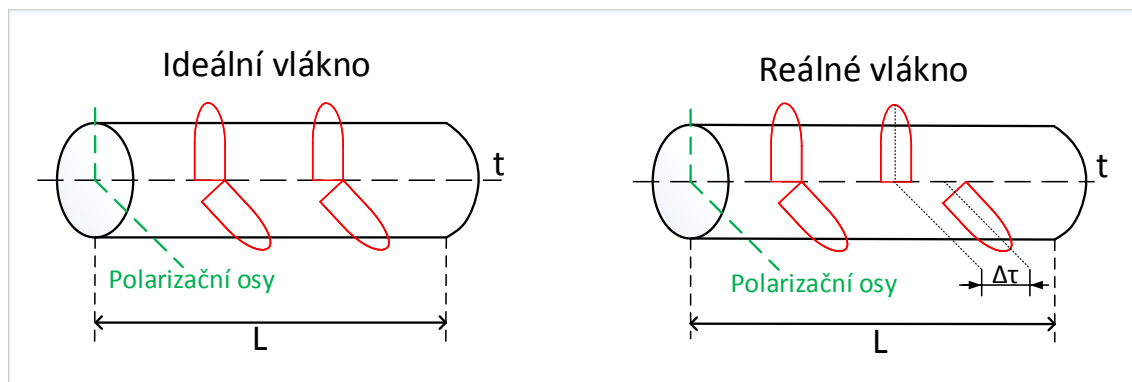
Vidovou disperzi můžeme na rozdíl od disperze vlnovodové vypustit pro jednovidová vlákna, protože v nich nemá velká význam. Vidová disperze vzniká tehdy, když jsou přenosové charakteristiky jednotlivých vidů v mnohovidových vláknech různé. Je tedy dána časovým rozdílem nejrychlejšího a nejpomalejšího vidu při jednom kmitočtu. Omezuje tak mezní šířku pásma, přenosovou rychlost a maximální dosah v mnohovidových vláknech s homogením jádrem. Vidová disperze je zmenšována uspořádáním vlákna, zejména použitím vláken s gradientní změnou indexu lomu. Princip vidové disperze můžeme vidět na Obr.1.5.[6]



Obr. 1.5: Princip vidové disperze

Polarizační vidová disperze

Polarizační vidová disperze (PMD – Polarization Mode Dispersion) vzniká v důsledku toho, že jednotlivé složky světelného paprsku se šíří rozdílnou rychlostí. Je to v poslední době jeden s největších problémů při přenosech na optických trasách. Je způsobena rozdílným indexem lomu v osách x a y, které jsou kolmé ke směru šíření paprsku v optickém vlákne. Na konci vlákna dochází k časovému posunu mezi složkou x a y. Podrobný popis této problematiky nalezneme v kapitole 2



Obr. 1.6: Princip PMD

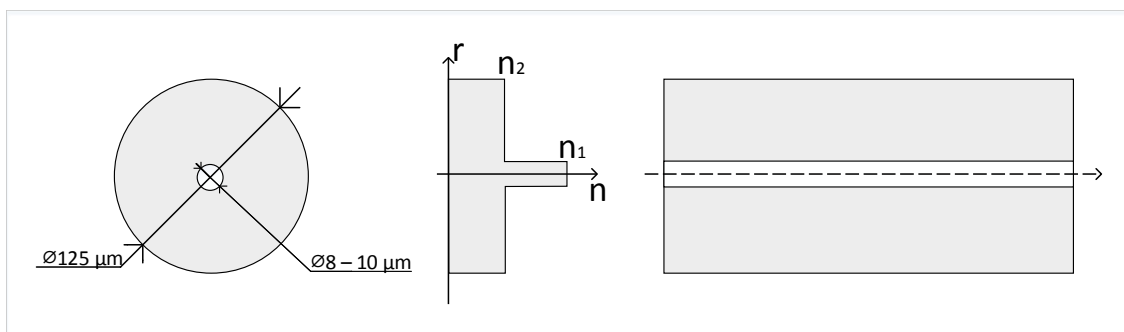
1.4 Typy optických vláken

Optická vlákna lze dělit podle různých parametrů. Jedno z nejdůležitějších rozdělení je podle počtu vidů, které mohou přenášet. Takto dělíme vlákna na jednovidová a mnohovidová.

1.4.1 Jednovidová optická vlákna

Tato optická vlákna jsou známá tím, že mají velmi malý průměr jádra $9\text{ }\mu\text{m}$ a při dané numerické apertuře a vlnové délce umožňují přenos pouze jednoho vidu. Musí být splněna podmínka, ve které platí, že normalizovaná frekvence V musí být menší než 2,405. [1]

Obecně u těchto vláken lze dosáhnout nižších hodnot útlumů a disperzí, takže je lze s výhodou použít u dálkových přenosů. Vzhledem k malému jádru je nutné používat zdroje záření s nízkou spektrální šířkou (např. lasery). Strukturu jednovidového optického vlákna vidíme na Obr.1.7.

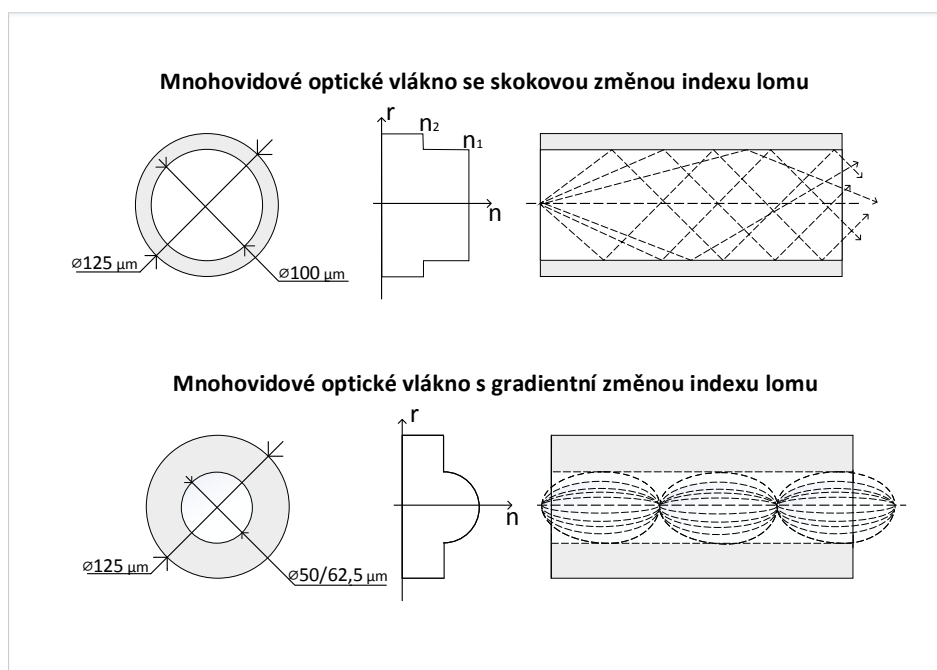


Obr. 1.7: Jednovidové optické vlákno

1.4.2 Mnohovidová optická vlákna

Pro mnohovidová vlákna se používají optické kabely s průměrem jádra 50 až 100 μm a o vlnové délce 850nm. Generátor světla vytváří světelné impulsy, které tvoří několik paprsků. Tyto paprsky se odráží od obalu jádra v různých úhlech – v různých dráhách.[1]

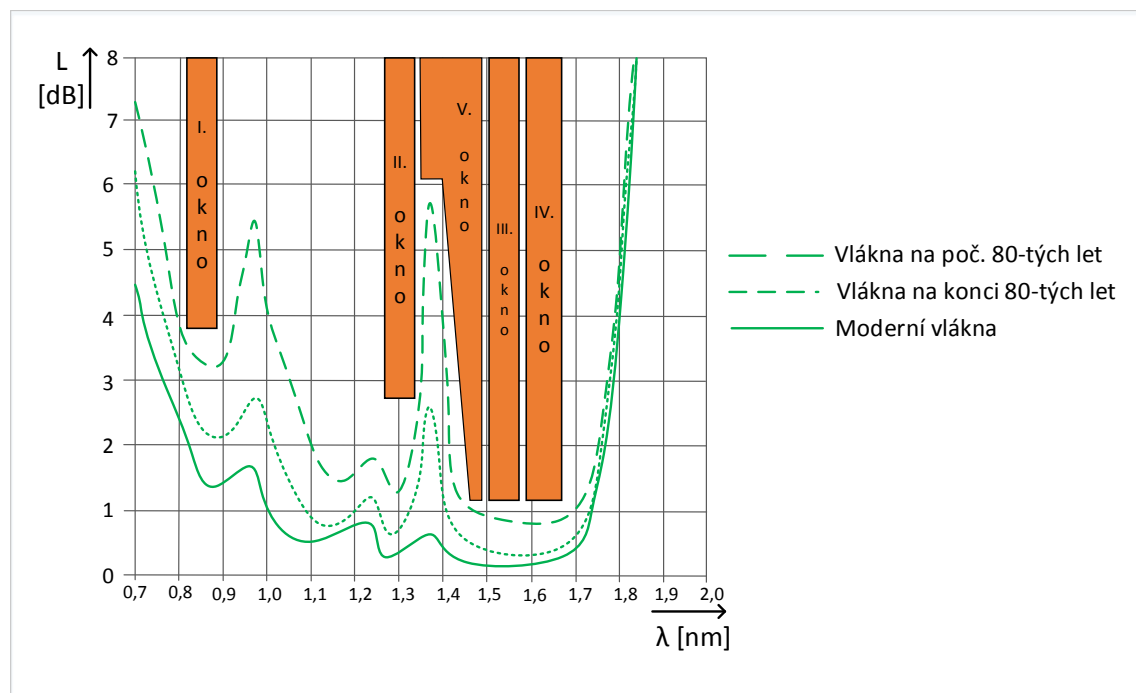
Pro tyto vlákna musí být splněna podmínka, ve které platí, že normalizovaná frekvence V je větší než 2,405. Vlákna jsou vhodná pro přenosy na krátké vzdálenosti a dělíme je na optická vlákna se skokovou a gradientní změnou indexu lomu. Strukturu a rozdíly mnohovidového optické vlákna vidíme na Obr.1.8.[1]



Obr. 1.8: Mnohovidové optické vlákno se skokovou a gradientní změnou indexu lomu

1.5 Telekomunikační okna

Pro přenos optického signálu v optickém vlákne používáme různá přenosová pásma, tzv. telekomunikační okna. Ty jsou dány velikostí útlumu a disperze. Telekomunikační okna vidíme na Obr.1.9.



Obr. 1.9: Závislost útlumu na vlnové délce a vyznačená telekomunikační okna

I. okno

Útlumová charakteristika je klesající, avšak hodnoty měrného útlumu jsou pro dálkové přenosy stále vysoké. Toto telekomunikační okno se využívá pro mnohovidová optická vlákna.[7]

II. okno (1280 - 1335 nm)

Je nejnižším oknem pro jednovidový přenos. Dosahované hodnoty měrného útlumu se pohybují pod úrovní 0,35 dB/km. Toto okno je vhodné pro přenosy na střední vzdálenosti.[7]

III. okno (1530 - 1565 nm)

V tomto okně dochází k nejmenšímu měrnému útlumu, který se pohybuje okolo úrovně 0,2dB/km. Okno je využíváno pro dálkové přenosy.[7]

IV. okno (1565 - 1610 nm)

Okno se nachází hned za absolutním minimem měrného útlumu. Parametry tohoto okna se od útlumových parametrů třetího okna příliš neliší. Když spojíme při dálkových přenosech III. a IV. okno zdvojnásobíme přenosovou kapacitu. Této technice se říká technika WDM.[7]

V. okno (1335 – 1530 nm)

Pro přenosy použitelné od konce 90. let, kdy byly technicky zvládnuty metody výroby optického vlákna eliminující příměsi OH iontů natolik, že se ztrácí hlavní lokální maximum na 1380 nm. Spojená přenosová okna tvoří přenosový kanál o šířce pásma 50 THz.[7]

1.6 Dělení optických vláken podle ITU-T

Podle doporučení ITU-T se optická vlákna rozdělují na:[1]

- G.652 A, B, C a D – konvenční vlákna (non-DSF),
- G.653 A a B – vlákna s posunutou disperzí (DSF),
- G.654 A, B a C – vlákna s posunutou mezní vlnovou délkou (CSF),
- G.655 A, B, C, D a E – vlákna s posunutou nenulovou disperzí (NZ-DSF),
- G.656 – vlákna s posunutou nenulovou disperzí pro širokopásmový optický přenos (NZ-DSF),
- G.657 A a B – vlákna méně citlivé na ohyby pro přístupové sítě.

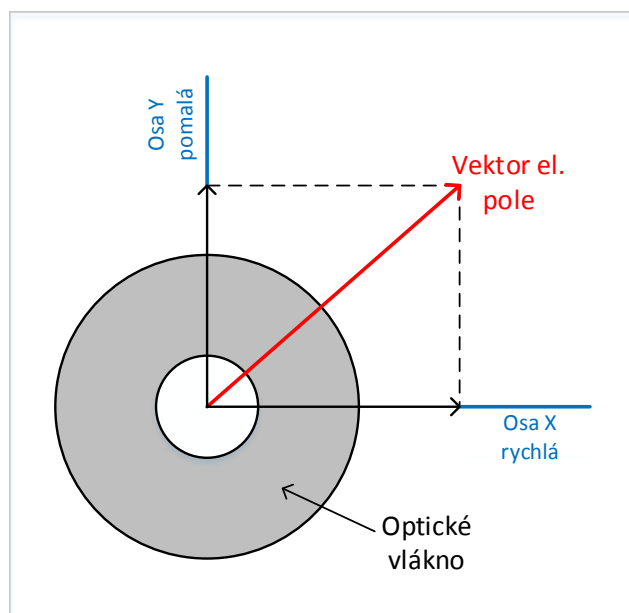
2 POLARIZAČNÍ VIDOVÁ DISPERZE - PMD

Polarizační vidová disperze je způsobena polarizací světla. Jednotlivé složky světla se šíří různou rychlostí ve dvou složkách, které se dají nazvat jako horizontální a vertikální rovina. PMD vede k nežádoucímu časovému roztažení a zkreslení signálu a tak omezuje šířku pásma a linearitu přenosu.

Jedná se o náhodný jev proměnný v čase, protože polarizační vidovou disperzi kromě výroby vlákna ovlivňuje i kabelování a vliv okolního prostředí. PMD je v současnosti hlavním problémem vysokorychlostních přenosů přes optická vlákna.

2.1 Vznik PMD

V jednovidových optických vláknech se signál šíří ve dvou polarizačních rovinách, které jsou navzájem kolmé. Za předpokladu, že by bylo jádro dokonale kruhové v celé své délce, by se obě polarizační roviny (vidy) šířily stejně rychle. Reálně není možné takové vlákno vyrobit, a proto v něm dochází k dvojlomu, jehož vlivem se v obou polarizačních rovinách šíří vidy různou rychlostí. Po průchodu signálu vláknem pak dochází k časovému zpoždění mezi vidy obou polarizačních rovin. Tento jev se zhoršuje při jakékoliv kruhové nesymetrii optického vlákna. Model polarizačních rovin vidíme na Obr.2.1.[8]



Obr. 2.1: Model polarizačních rovin

Asymetrie vlákna je poměrně konstantní, zatímco mechanické namáhání v důsledku

pohybu s vlákny se mohou lišit. Asymetrie vzniká, když je jádro vlákna oválné. Je to způsobeno tím, že optická vlákna nejsou v praxi zcela dokonale kruhové a proto říkáme, že ve vláknu je přítomen dvojlom. Vlivem dvojlomu se světelné záření šíří v obou polarizačních videch s různou rychlostí a mezi vidy dochází k časovému zpoždění.

Pokud bereme osu z jako směr šíření vlnění, potom roviny x a y můžeme označit jako horizontální, resp. vertikální. Tento model os se označuje jako PSP (Principal States of Polarization). Pokud složku x a y sloučíme dohromady, dostaneme vektor elektrického, resp. magnetického pole. Polarizační vidy mají na konci trasy mezi sebou určité časové zpoždění a proto dochází k omezení maximální přenosové rychlosti. Polarizační vidová disperze je spektrální střední hodnotou diferenční skupinové zpoždění DGD. PMD se pak rovná součtu DGD jednotlivých kabelových úseků podělených celkovou délkou trasy. Při měření takových vláken v časové oblasti je PMD vyjádřena časovým zpožděním obou polarizačních vidů.[8]

Parametr DGD ze v závislosti na vlnové délce mění velmi rychle, narozdíl od změny v časové oblasti. Celková hodnota PMD vlákna optické trasy je vyjádřena jednotkou ps. Časové rozšíření impulsu vede ke snížení amplitudy signálu, čímž se zhoršuje hodnota odstupů signálu od šumu a tím dojde i k roztažení impulzu až do sousedních bitových mezer. Tento úkaz nazývá mezisymbolová interference.[8]

Velikost polarizační vidové disperze ovlivňuje jak samotná výroba kabelu, ale především další vlivy, které můžou způsobit jakékoliv deformace kabelu. Vliv na parametr PMD může mít také ve velké míře vliv okolního prostředí na optický kabel.

2.2 Matematické vyjádření polarizační vidové disperze

Polarizační vidová disperze se dá popsat dvěma hlavními způsoby - pomocí Stokesova a Jonesova prostoru.

2.2.1 Stokesův prostor

První způsob, kterým se dá popsat PMD je Stokesův prostor. V tomto případě vstupní polarizační vektor s_a dává vznik výstupnímu polarizačnímu vektoru s_b . Pokud víme, že frekvence roste do $\omega + d\omega$ a vektor s_a je považován za frekvenčně nezávislý, pak změněný vektor S_b je dán:[10]

$$\frac{d}{d\omega} s_b = \Omega \times s_b. \quad (2.1)$$

Stokesův vektor Ω je definován jako funkce frekvence. N-tý řád PMD je charakterizovaný N-tou derivací PMD vektoru Ω s ohledem na frekvenci. Stokesův vektor je alternativní popis polarizace a používá čtyři (reálné) Stokesovy parametry, které jsou funkcí pozorovatelné světelné vlny. Stav polarizace každého světelného paprsku (totálně, částečně, nebo nepolarizovaného) může být tedy pro koherentní světlo popsán:[10]

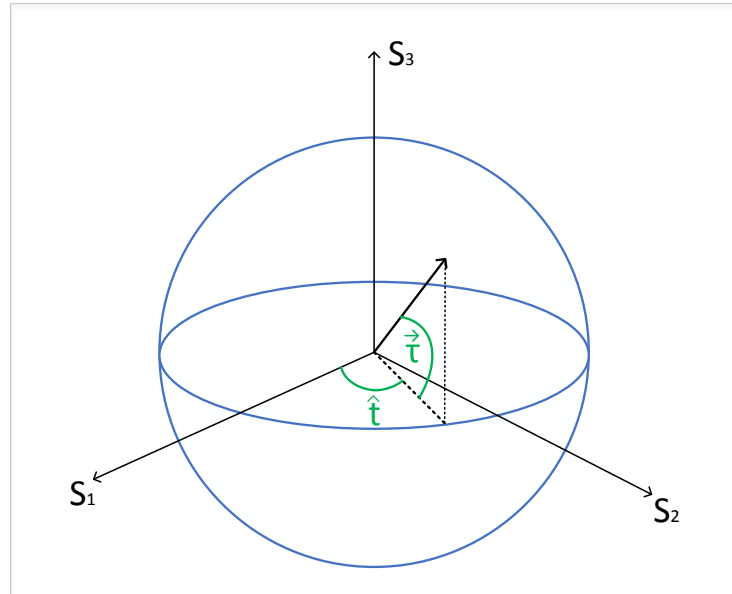
$$s_0 = s_x s_x^* + s_y s_y^*, \quad (2.2)$$

$$s_1 = s_x s_x^* - s_y s_y^*, \quad (2.3)$$

$$s_2 = s_x s_x^* + s_y s_y^*, \quad (2.4)$$

$$s_3 = j(s_x s_x^* - s_y s_y^*). \quad (2.5)$$

Definujeme si $s = (s_1, s_2, s_3)$ jako 3D Stokesův vektor, který ukazuje délku polarizace pole odpovídající dvojdimenzionální matici $\begin{pmatrix} s_x \\ s_y \end{pmatrix}$. Graficky lze všechny možné polarizační stavy vyjádřit tzv. Poincarého koulí, vidíme na Obr.2.2:



Obr. 2.2: Poincarého koule

Lineární polarizace se nachází na rovníku této koule, kruhové polarizace jsou na jejích pólech a zbylý prostor odpovídá eliptické polarizaci.

2.2.2 Jonesův prostor

Druhý způsob, kterým se dá popsat polarizační vidová disperze je Jonesův prostor. Stav polarizace se zjišťuje z hodnot amplitud a fáze. Jsou reprezentovány pomocí

dvojdímenzionálního komplexního Jonesova vektoru:[10]

$$e = \begin{pmatrix} a_1 & e^{i\theta_1} \\ a_2 & e^{i\theta_2} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Po vynásobení komplexní jedničkou se nezmění stav polarizace, daný její elipsou, ale jen elektrické pole o danou část fáze, kterou dané číslo reprezentuje. Elektrické pole závisí na fázi, ale polarizace nikoli. Báze vektorů pro reprezentaci Jonesova vektoru nemusí reprezentovat lineární stavy polarizace (nemusí být reálná). Obecně mohou posloužit jakékoli dva ortogonální stavy, ortogonální vektory jsou definovány tak, že mají nulový skalární součin. Častou volbou je pravo a levotočivá kruhová polarizace pro model jejich odlišného šíření v opticky aktivních látkách.

Šíření paprsku se popisuje pomocí transformace matice (2.6) maticí 2×2 zvané Jonesova matice:[10]

$$e^T = J e \quad (2.7)$$

Pro šíření dvou kolmých módů můžeme Jonesovu matici napsat:

$$J = T \begin{pmatrix} g_1 & 0 \\ 0 & g_2 \end{pmatrix} T^{-1} \quad (2.8)$$

kde g_1, g_2 jsou komplexní čísla udávající změnu amplitudy a fáze daného módu a T je matice, která popisuje změnu báze z námi zvolené báze šíření záření na bázi danou vlastností prostředí. Jonesova matice T může být potom:

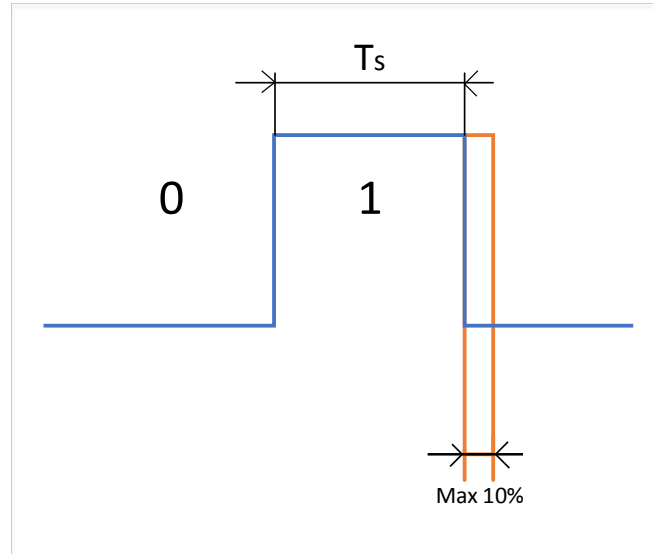
a) unitární - amplituda se nemění, dochází však ke změně fázového rozdílu mezi složkami

b) hermitovská - mění se pouze amplituda

Každá matice lze zapsat jako součin unitární a hermitovské matice. Platí tedy, že matici T označujeme jako unitární, jestliže inverzní matice T^{-1} je rovna matici hermitovsky sdružené T^\dagger , tzn. $T^{-1} = T^\dagger$, kde $T^\dagger = (T^T)^*$

2.3 Limitní parametry PMD

Polarizační vidová disperze, respektive DGD, má velký vliv na rozšíření pulzu. Jsou dané normy podle ITU, které stanovují maximální hodnoty DGD při různých bitových rychlostech. Norma udává maximální DGD, která není větší než $1/10$ doby trvání jednoho signálového prvku viz Obr.2.3, který ukazuje maximální rozšíření impulsu signálového prvku. Maximální rozšíření impulsu signálového prvku může být maximálně 10%. Následkem je omezení přenosové vzdálenosti pro danou bitovou chybovost.[11]



Obr. 2.3: Maximální rozšíření impulsu signálového prvku

Tab. 2.1: Limitní hodnoty PMD pro různé rychlosti přenosu

| Limitní hodnoty PMD | | | |
|-----------------------------------|-------|--------|--------|
| Přenosová rychlost [Gbitps] | 2,500 | 10,000 | 40,000 |
| SDH | STM16 | STM64 | STM256 |
| Limit PMD [ps] | 40 | 10 | 2,51 |
| Koeficient PMD [ps/\sqrt{km}] | <2 | <0,5 | <0.125 |

Jestliže známe maximální zpoždění PMD potom maximální povolenou délku vlákna můžeme odvodit ze vztahu:

$$L = \frac{\Delta\tau^2}{\Delta\tau_{e_{max}}^2} \quad (2.9)$$

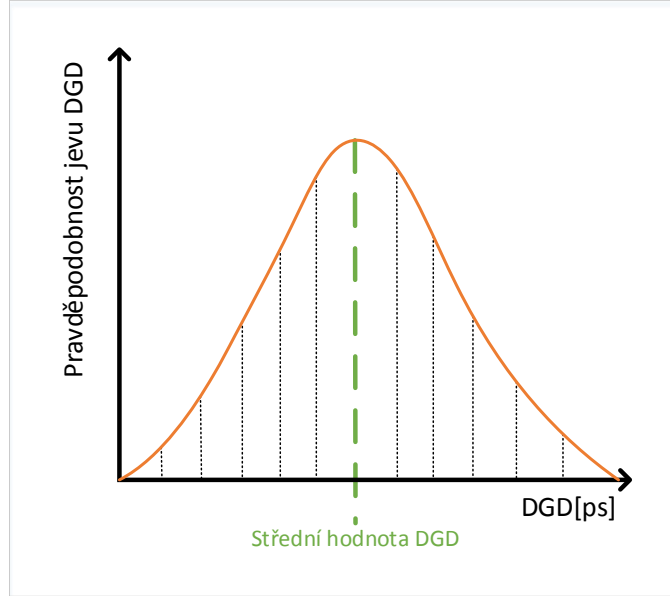
Pro přenosovou rychlost 10 Gb/s je bitová délka 100 ps. Z těchto informací lze vypočítat teoretické maximální PMD zpoždění s využitím vzorce $\Delta\tau = 0,1 * 100 = 10[ps]$. Limitní hodnoty pro další přenosové rychlosti podle doporučení ITU-T G.967 vidíme v tabulce 2.1.[1]

Polarizační vidová disperze, jelikož se jedná o náhodný jev nemůže být charakterizována okamžitou DGD hodnotou. DGD hodnota kolísá náhodně kolem střední hodnoty popsané Maxwellian křivkou. Spektrální střední hodnota je efektivní hodnota DGD z hustoty pravděpodobnosti v celkové optické trase. Jelikož můžeme PMD vektor rozložit do tří vektorů podél os Poincareho koule, tak se každý z nich může nezávisle a náhodně měnit a můžeme ho popsat gausovou křivkou. Maxwellian dis-

tribuční funkci zobrazenou na Obr.2.4 můžeme zapsat rovnicí:[11]

$$p(\Delta\tau) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta\tau^2}{\sigma^3} e^{((- \Delta\tau^2)/(2\sigma^2))} \quad (2.10)$$

pro $0 < \Delta\tau < +\infty$ kde $\Delta\tau$ je DGD $\Delta\tau^2$ odchylka.



Obr. 2.4: Maxwellian distribuční funkce

2.3.1 Závislost PMD na délce optického vlákna

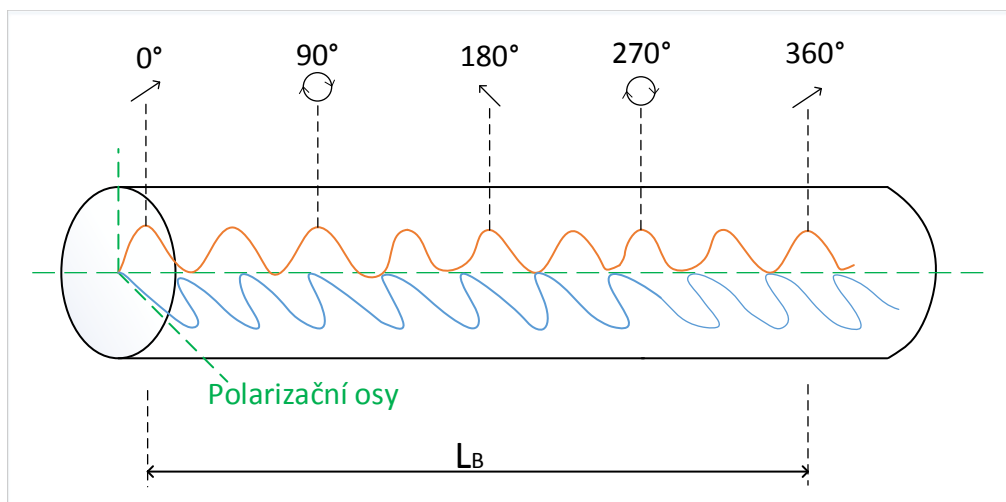
Optická vlákna, která mají střední výkonovou hodnotu v jednom ortogonálním polarizačním vidu v rámci $1/e^2$ výkonového počátečního stavu vidu jsou nazývány jako vazební délka L_c . Tento parametr je závislý na vlnové délce, mechanickému namáhání podél vlákna a teplotě.

Polarizační vidová disperze v krátkých vláknech

Je-li délka optického vlákna menší než korelační délka L_C jedná se o vlákno krátké. PMD je na krátkých vzdálenostech téměř lineární a můžeme jej vyjádřit vztahem:[8]

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{L} \quad (2.11)$$

V krátkých vláknech se vstupní polarizační poloha mění v kruhový tvar v důsledku šíření světelného paprsku vláknem, např. z lineárního do eliptického tvaru a poté do



Obr. 2.5: Prostorový vývoj polarizace

kruhového a zpět přes eliptický k lineárnímu stavu. Vidíme na Obr.2.5:[8]
Z obrázku vidíme, že vzdálenost L_B je vzdálenost šíření, kde dochází k 2π fázovému rozdílu mezi jedním a druhým videm a je daný vztahem:[8]

$$L_B = \frac{\lambda}{\delta n} \quad (2.12)$$

kde λ je vlnová délka a δn je rozdíl indexu lomu. Standartní typ vlákn jako je tento má velikost kolem 10m.

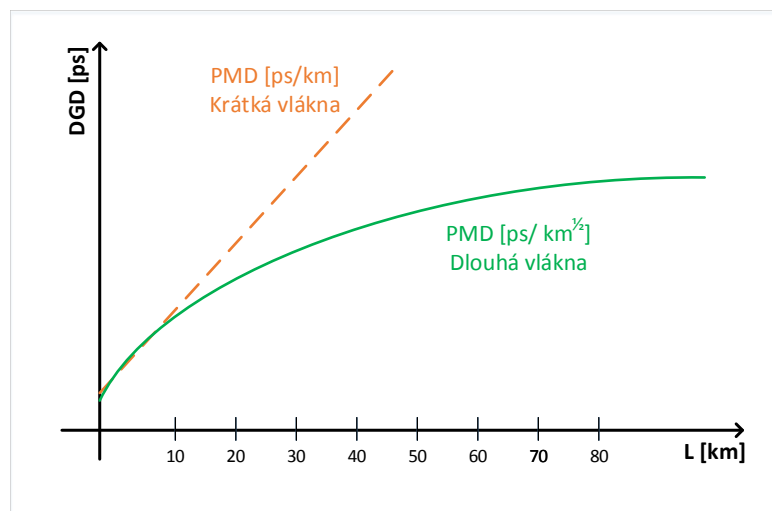
Polarizační vidová disperze v dlouhých vláknech

Je-li délka optického vlákna větší než korelační délka L_C bavíme se o vlákně dlouhém. Dlouhá vlákna mohou být modelována jako zřetězení několika sekcí jehož osy a velikost dvojlomu se mění náhodným způsobem. Velikost polarizační vidové disperze v závislosti na délce kabelu vidíme na Obr.2.6:[8]

Pokud uvažujeme dlouhé vlákno jako jakýsi model, můžeme ho zobrazit jako mnoho úseků s rozdílnou hodnotou dvojlomu jejichž změna je náhodná podél celého optického vlákna. Velikost dvojlomu z každého úseku může být přičten nebo naopak odečten od dvojlomu pro celé optické vlákno. Z toho vyplývá, že DGD se nezvětšuje lineárně s délkou vlákna jako tomu je u krátkých vláken. Pro dlouhá vlákna můžeme PMD tedy vyjádřit vztahem:[8]

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} \quad (2.13)$$

Velikost DGD se podle prostředí vlákna značně liší, proto je pro analýzu PMD v dlouhých vláknech použit statistický postup. Jelikož většina přenosových systémů je



Obr. 2.6: Závislost PMD na délce kabelu

budována na dlouhé vzdálenosti, jsou PMD vlákna popsána pomocí PMD koeficientu (ps/\sqrt{km}). Vlákna vyrobená dnes mají průměrný PMD koeficient menší než $0,1 ps/\sqrt{km}$. U starších vláken vyrobených před rokem 1997 hrozí riziko vysoké hodnoty PMD.

2.3.2 Vlivy na vznik PMD

Ideální vlákno je zcela homogenní a ideálně kruhové. V realitě to tak úplně neplatí, protože reálné vlákno není nikdy zcela homogenní ani ideálně kruhové. Příčiny vzniku dvojlomu a tedy i polarizační vidové disperze rozdělíme na vnější a vnitřní.

Vlivy vnější

Vnější vlivy jsou vlivy takové, které působí na optické vlákno z venku. Tyto vlivy jsou závislé na tom jak je zacházeno s optickým vláknem při pokládání do trasy. Optická vlákno v tomto případě může podléhat změně barometrického tlaku, změně teploty nebo např. mechanickým vibracím, které jsou způsobeny průjezdem vlaků, aut a jiných dopravních prostředků. Díky těmto a dalším případům vnějších vlivů se těžko tyto vlivy kompenzují, proto je nutné dbát na správnou pokládku optického kabelu.

Do vnějších vlivů řadíme:

- kroucení vlákna,
- ohyb vlákna,
- tlak na vlákno.

Vlivy vnitřní

Vnitřní vlivy jsou vlivy takové, které jsou způsobeny nepřesnostmi již při výrobě vlákna. Takové vlákno není zcela homogenní ani ideálně kruhové. Nutností k minimalizaci těchto problémů je zpřesnit samotnou výrobu optického vlákna a dbát vysoké kontroly při výrobě.

Do vnitřních vlivů řadíme:

- tlak na jádro,
- eliptický tvar jádra,
- nesouměrný plášť,
- eliptický tvar pláště,
- vzduchová kapsa ve skle,
- nesouměrná sekundární ochrana,
- eliptický tvar sekundární ochrany.

3 METODY MĚŘENÍ PMD

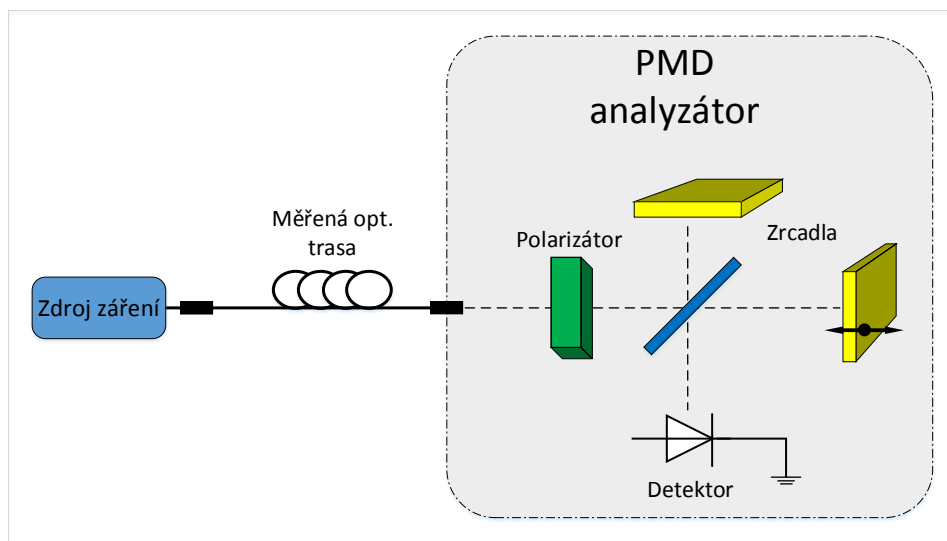
Polarizační vidová disperze je jev náhodný, není ji možné matematicky vyjádřit, proto je tedy nutné ji měřit. Zpoždění signálu v důsledku PMD je extrémně malé (řádu jednotek až desítek ps), jeho přímé měření není tedy možné, a proto se PMD provádí nepřímým měřením. Měření PMD v optickém vlákne se provádí od jeho výroby, kabelování, dále měření po instalaci optické trasy až po měření údržbová. Pokud v jakékoliv části měření optické vlákno vykazuje větší zpoždění PMD než je schopen tolerovat přenosový systém, nelze tento systém použít. V následujících řádcích si podrobně jednotlivé metody podrobně popíšeme.

3.1 Metoda TINTY (tradiční interferometrická metoda)

Tradiční interferometrická metoda TINTY je v současné době nejpoužívanější především z důvodu rychlosti měření, jednoduchosti a možnosti použití na již nainstalovaných trasách v terénu. Metoda TINTY je založena na interferenci nízko koherentního záření, při které se do vlákna navazuje spojitě široké spektrum lineárně polarizovaného záření, např. z LED zdroje. Ze zdroje putuje poté polarizované záření do P polarizátoru. Na druhém konci se pomocí PMD analyzátoru, jehož jádrem je nejčastěji Michelsonův interferometr, získává autokorelační funkce elektromagnetického pole vystupujícího z konce měřeného optického vlákna.[9]

V Michelsonově interferometru je polarizované optické záření rozděleno do dvou drah, jedna je ukončená pevným a druhá pohyblivým zrcadlem. Pohyblivé zrcadlo interferometru vytváří požadované zpoždění mezi dráhami záření. Optické záření se odráží od obou zrcadel zpět a na detektoru nastává interference signálů z obou částí, kde se měří intenzita interferenčního obrazce.

Díky širokospektrálnímu zdroji záření je výsledek definován jako střední hodnota zpoždění. V případě nepřítomnosti PMD dostaneme na výstupu z interferometru čistou autokorelační funkci záření. Aby byla autokorelační špička co nejužší a hladká a co nejméně ovlivňovala vyhodnocení měření, musí být zde použit zdroj záření se spektrálním průběhem blížícím se Gaussově křivce. Velká autokorelační špička může výsledek měření ovlivnit. Polarizační vidová disperze způsobuje roztažení základní autokorelační funkce v důsledku interference dvou polarizačních vidů. Z velikosti tohoto roztažení se poté spočítá PMD. Uspořádání zapojení metody TINTY vidíme na Obr.3.1:[9]

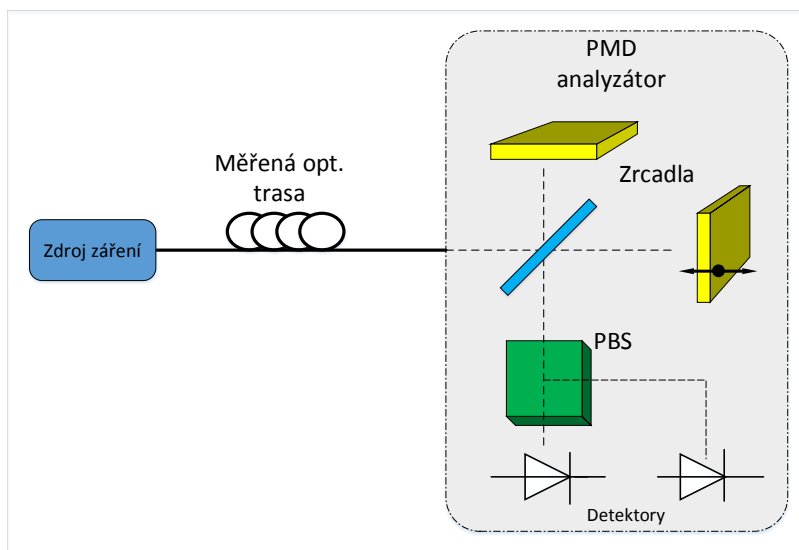


Obr. 3.1: Uspořádání zapojení metody TINTY

3.2 Metoda GINTY (všeobecná interferometrická metoda)

Tato metoda vychází z metody TINTY, kde však kvůli přítomnosti autokorelace ve výsledném interferogramu dochází k jistým omezením. Metoda GINTY je tedy upravená interferenční metoda, kde je pomocí vhodné detekce potlačena a odstraněna autokorelační špička a je tedy možné měřit narozdíl od metody TINTY i optické trasy, kde jsou přítomny optické zesilovače a některé další prvky.

Základní odlišnost oproti tradiční interferometrické metodě je ta, že výsledná signál, který obsahuje optické záření z obou drah interferometru je nově rozdělen polarizačním děličem PBS na dvě vzájemně kolmo polarizované složky, které dopadají každá na zvláštní detektor. Na každém z obou detektorů dochází k interferenci a oba tyto interferenční obrazce obsahují opět obě korelační složky. Matematickými operacemi mezi oběma interferogramy lze obě složky oddělit. U této metody není třeba pečlivě dodržovat tvar spektra zdroje záření jako u metody TINTY. Jedna z dalších výhod oproti tradiční metodě je ta, že celková naměřená hodnota PMD trasy je přesnější, protože se můžeme vyhnout nutnosti ji počítat z hodnot naměřených na každém zesilovacím úseku. Za další výhodu můžeme považovat také možnost měření velmi nízkých hodnot PMD dosahující 0 ps. Uspořádání zapojení metody GINTY vidíme na Obr.3.2:[9]



Obr. 3.2: Uspořádání zapojení metody GINTY

3.3 Metoda skenování vlnové délky (s fixním analyzátozem)

V měřicí metodě s fixním analyzátozem se polarizační vidová disperze měří ve spektrální oblasti, kdy se měří optický výkon záření procházejícího měřeným vláknem v závislosti na vlnové délce.

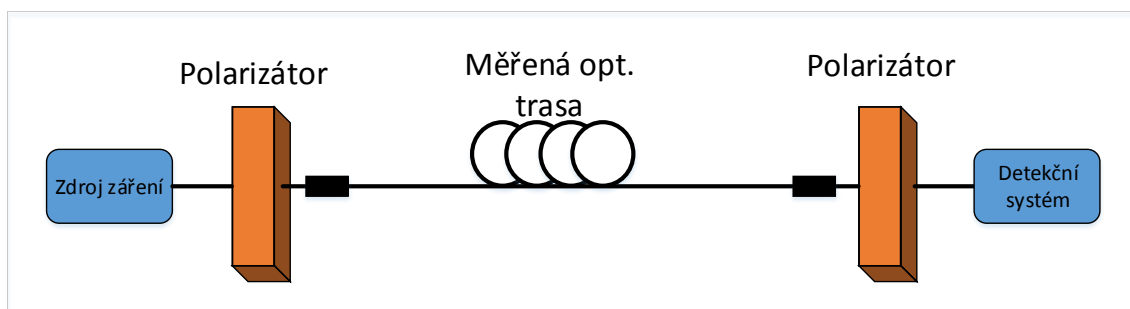
Jako zdroj záření je možné použít laditelný laser nebo širokospektrální LED diodu. Záření z tohoto zdroje je přes polarizátor navázáno do měřeného optického vlákna. Na výstupu z optického vlákna přes další polarizátor je použit takový detekční systém, který je schopen podle zdroje záření provádět měření výkonu v závislosti na vlnové délce. Např. pro laditelný laser to může být obyčejný měřič výkonu, pro širokospektrální zdroj je použit optický spektrální analyzátor. Měřicí sestavu vidíme na Obr.3.3.[13]

Měření se provádí ve dvou stupních. V prvním stupni se měří výstupní optický výkon v daném spektrálním rozsahu, kdy úhlová orientace obou polarizátorů zůstává neměnná. Získáme tak spektrální závislost složky výkonu o určité polarizaci (dané polarizátorem) $P(\lambda)$. Ve druhém stupni se odstraní analyzátor před detekční stranou a opakuje se měření ve stejném spektrálním rozsahu, kdy získáme spektrální závislost celkového výkonu $P_{tot}(\lambda)$. Celkovým výsledkem měření je poměr obou spektrálních průběhů výkonu $P(\lambda)/P_{tot}(\lambda)$. Z tohoto poměru vyplývá spektrální závislost změny polarizace výstupního záření a hodnotu PMD lze v tomto případě stanovit výpočtem pomocí vztahu:[13]

$$PMD = kn\lambda_1\lambda_2/[(\lambda_1 - \lambda_2)c], \quad (3.1)$$

kde k je koeficient vazby vidů, n je počet extrémů detekovaného optického výkonu v závislosti na vlnové délce a c je rychlost šíření světla ve vakuu. Z výše uvedeného vztahu je patrné, že menší počet extrémů znamená menší hodnotu PMD. Pro dosažení větší přesnosti měření je proto třeba volit širší spektrální interval měření tak, aby počet extrémů byl větší než 10.

Ke stanovení PMD v této metodě lze použít také Fourierova analýza spektrální závislosti optického výkonu. Fourierova analýza převádí naměřené spektrální výsledky z frekvenční oblasti do oblasti časové a tak můžeme získat informace roztažení impulsu v čase.



Obr. 3.3: Metoda skenování vlnové délky

3.4 Metoda P-OTDR

Jedná se o nepřímou metodu měření pomocí lokalizace úseků se zvýšenou hodnotou PMD. Měření probíhá pomocí polarizačního reflektometru OTDR a využívá se principu zpětného rozptylu. Do trasy s optickým vláknem se vyšle měřicí signál, který je ve formě sledu impulsů a ze zpětně rozptýleného záření vlivem Rayleighova zpětného rozptylu se zjišťují hodnoty PMD na různých místech měřené trasy. Jak již bylo zmíněno výše, jedná se o nepřímou metodu měření proto na vyjádření závislosti PMD vlákna trasy použijeme vztah: [14]

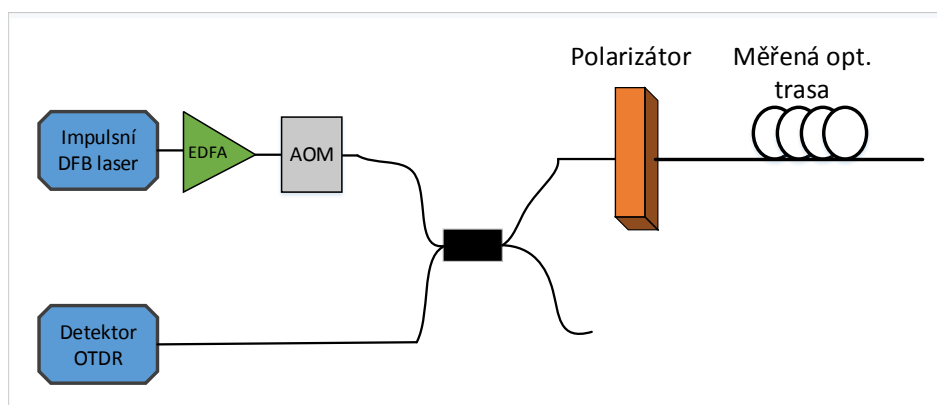
$$PMD = \beta \sqrt{Lh}, \quad (3.2)$$

kde β je velikost dvojlomu ve vlákně [ps/km], L je délka vlákna [km] a h je charakteristická vazba mezi polarizačními vidy. Ze vztahu je patrné, že velikost PMD roste s velikostí dvojlomu ve vlákně, délkou vlákna a s velikostí vazební délky. Čím bude delší vazební délka a tudíž menší výměna energie mezi oběma vidy šířícími se odlišnou rychlostí, tím více se bude odlišnost rychlostí obou polarizačních vidů uplatňovat.[14]

Jelikož při každém měření získáváme pouze informace o délce vlákna, musíme pro podélnou analýzu PMD zjistit ještě informace o lokálním dvojlomu a vazební délce. Pro zjištění těchto informací se používají dvě základní metody, a to metoda analýzy SOP a DOP.

3.4.1 Metoda analýzy SOP

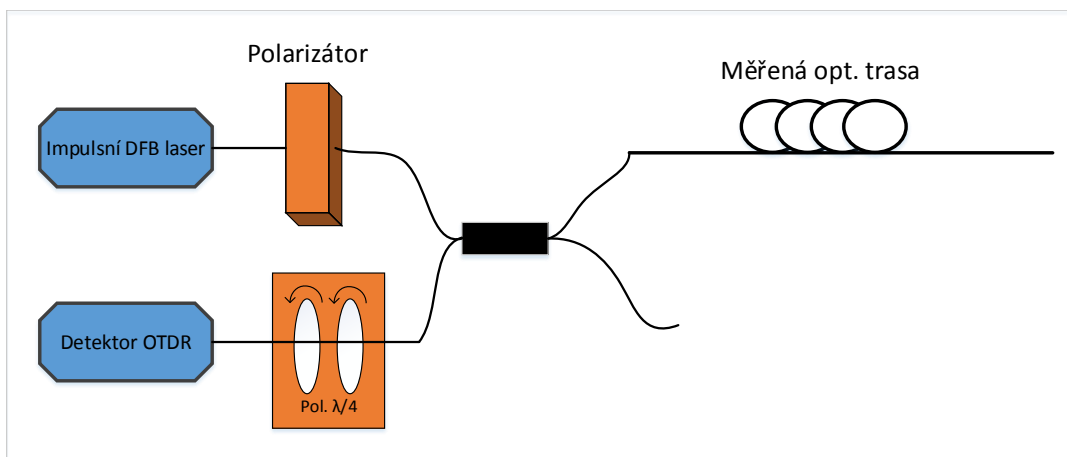
Jelikož vlivem dvojlomu dochází ke změně polarizace, můžeme sledováním této změny na zpětném rozptylu záření sledovat změny stavu polarizace SOP (State of Polarization). Tato metoda je vhodná pro měření krátkých optických tras řádově v jednotkách km s nízkou hodnotou PMD (cca do $7 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$). Rychlost změny SOP je úměrná velikosti dvojlomu ve vlákne β a charakteristické vazební délce h . Měřením na více vlnových délkách můžeme vyhodnotit ze spektrální závislosti změn SOP pro určitá místa vlákna velikost PMD. Blokové schéma analýzy SOP vidíme na Obr.3.4: [14]



Obr. 3.4: Blokové schéma analýzy SOP

3.4.2 Metoda analýzy DOP

Druhá metoda analýzy je na rozdíl od metody SOP založena na sledování stupně polarizace DOP (Degree of Polarization). Tato metoda je vhodná pro měření na dlouhých optických trasách, řádově až stovky km a lze lokalizovat úseky se zvýšenou hodnotou PMD s přesností na několik desítek metrů. Na výslednou hodnotu PMD mají značný vliv jednotlivé parametry jako je například silný dvojlom, který ve vláknu způsobuje rychlé stáčení stavu polarizace, což má za následek snižování stupně polarizace DOP. Pro správnou analýzu je důležité sledovat nejen výslednou hodnotu DOP, ale také rychlost, kterou ke změně DOP dochází. Blokové schéma analýzy DOP vidíme na Obr.3.5: [14]



Obr. 3.5: Blokové schéma analýzy DOP

3.5 Metoda polarimetrická

Tato metoda je dle doporučení ITU-T označena jako referenční hodnota pro měření polarizační vidové disperze. Je založena na komplexní analýze polarizačního stavu optického záření procházejícího měřeným optickým vláknem. Polarimetrická metoda obsahuje více metod, které jsou si velice podobné, jelikož všechny pracují na principu zjišťování komplexních informací o polarizačním stavu na vstupu a výstupu měřené trasy, což metody interferometrické ani metoda skenování vlnové délky neumožňují.

Metody polarimetrické dělíme na:[13]

- metoda analýzy Jonesovy matice,
- metoda Poincarého koule,
- metoda polarizačních stavů (SOP).

Jedna z hlavních výhod těchto metod je, že oproti ostatním metodám známe veškeré informace o polarizaci vstupního a výstupního záření, proto jsou tyto metody velice přesné a umožňují vysokou opakovatelnost měřených výsledků. Hlavní nevýhoda je velká časová náročnost měření a náchylnost měřicího systému na vibrace. Tyto metody se používají pro přesná měření PMD malých hodnot, například při výrobě optických součástí.[13]

4 KOMPENZACE PMD

Účinnou metodou jak snížit vliv hodnoty PMD na přenos bez nutnosti vyměnit optické vlákno nebo části optického vlákna je kompenzace. Největším problémem polarizační vidové disperze je náhodný charakter tohoto jevu a taktéž proměnnost v čase. Tyto problémy nám znesnadňují kompenzaci PMD. Proto musí být kompenzace dynamická a musí včasné reagovat na změny hodnot PMD. Je využíván zpětnovazební chybový signál, který obsahuje aktuální stav PMD v optickém vlákne a umožňuje nám nastavení aktuálního stupně kompenzace.

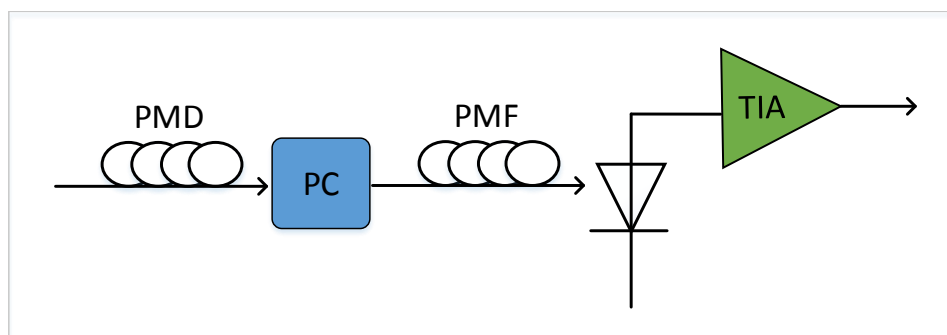
Pro vlastní kompenzaci se používají tzv. kompenzátory, které nám umožňují snížit hodnotu PMD. Každý kompenzátor má určité parametry, které určují stupeň kompenzace, neboli stupeň volnosti (DOF - Degree Of Freedom). S roustoucím DOF nám roste počet možností kompenzace. Kompenzační metody dělíme na:

- optické,
- optoelektronické,
- elektronické.

4.1 Optická metoda kompenzace

První metoda kompenzace, kterou vidíme na Obr.4.1 vyžaduje polarizační kontrolér PC a také část vlákna s identickou polarizací PMF, které je vyrobeno s velkým kontrolovaným dvojlomem a umožňuje generovat přesnou velikost DGD zpoždění. Kompenzace se v tomto případě provádí před přenosem. Polarizační kontrolér využívá srovnání polarizačního stavu světelného signálu na vstupu vláknové linky se zpožděním DGD ve vláknu PMF.

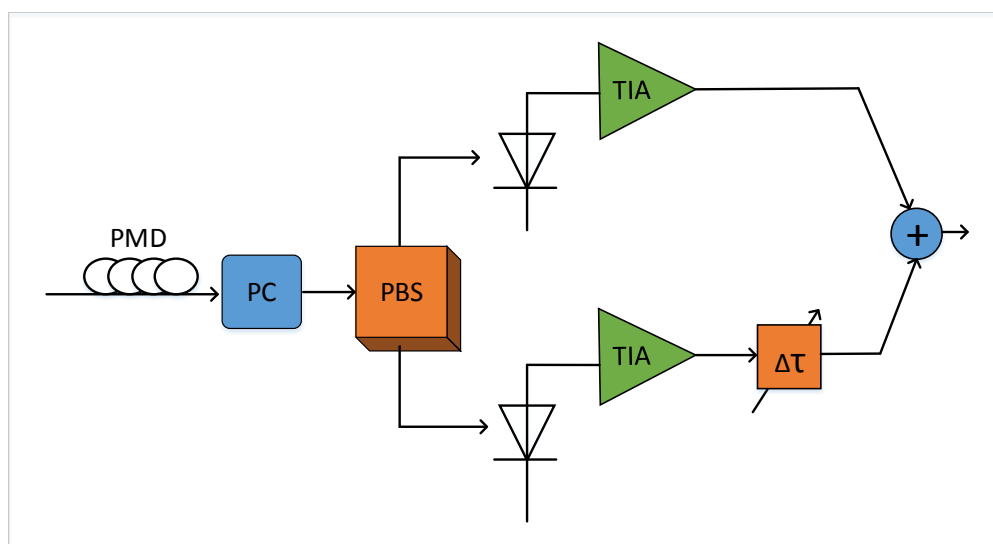
Nevýhoda této metody je ta, že umožňuje kompenzovat pouze PMD prvního řádu. Další hlavní nevýhodou je malá přizpůsobivost a flexibilita optických komponent pro potřeby při kompenzaci PMD.[12]



Obr. 4.1: Princip optické kompenzace

4.2 Optoelektronická metoda kompenzace

Druhou možností kompenzace PMD jevů je optoelektronická metoda. Tato metoda využívá jak systému optické metody tak i systému metody elektrické. Systém optoelektronické metody obvykle obsahuje polarizační kontrolér PC přes který prochází optický paprsek do PBS (polarization beam splitter), kde je rozdělen do dvou polarizačních modelů. Oba tyto světelné signály jsou pomocí dvou TIA (photodiode-transimpedance amplifier) zesilovačů převedeny na signály elektrické. Tento elektrický signál odpovídá světelnému paprsku v SOP (State Of Polarization), který je poté zpožděn interním porovnávačem DGD zpoždění. Oba signály jsou poté znovu sloučeny do signálu, který byl přijímán, avšak bez PMD efektu. Princip optoelektronické metody vidíme na Obr.4.2:[12]



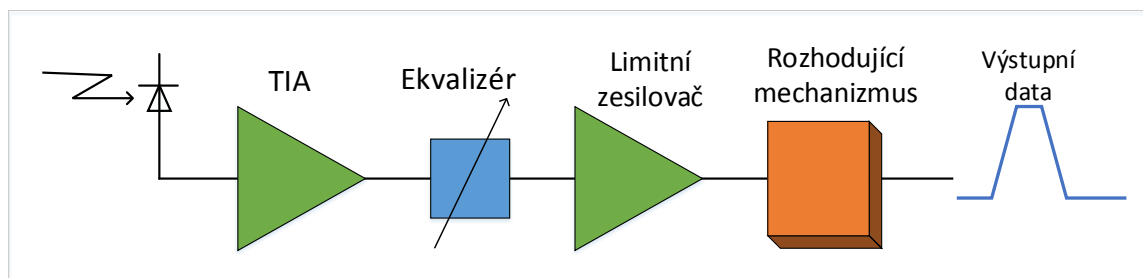
Obr. 4.2: Princip optoelektronické metody

Hlavní výhodou této metody je možnost přesunout některé kompenzační prvky z optické do elektrické oblasti, aby bylo možno lépe provádět kompenzaci. Nevýhody jsou podobné jako u předchozí metody, jelikož tato metoda stále obsahuje některé optické prvky.

4.3 Elektronická metoda kompenzace

Poslední metodou pro kompenzaci PMD efektu je metoda elektronická. Princip této metody je ten, že po konverzi světelného signálu do elektrické formy pomocí TIA zesilovače se provádí pomocí vyrovnání přijímaného signálu. Za TIA zesilovač je

umístěn elektrický ekvalizér, který umožňuje vysokou úroveň integrace a oproti optickým řešením má výrazně nižší cenu. Vysoká úroveň integrace je velice důležitá pro WDM systémy, jelikož je v těchto systémech kompenzace PMD jevu potřebná pro každý kanál. Jelikož elektronický systém je velice přizpůsobivý je pro kompenzaci PMD jevu nejvhodnější. Pomocí adaptibilního algoritmu je možné tuto přizpůsobilost systému jednoduše implementovat. Princip elektronické PMD kompenzace vidíme na Obr.4.3:[12]



Obr. 4.3: Blokové schéma elektronické PMD kompenzace

5 PRAKTICKÁ ČÁST MĚŘENÍ PMD

V praktické části bakalářské práce jsou navrženy tři scénáře automatizovaného měření na reálné optické trase Brna a tři scénáře pro měření vlivu PMD při mechanickém namáhání, které může být např. zkrut, zlomení nebo tlak na optické vlákno. Měření reálné trasy a měření mechanického namáhání bylo prováděno měřícím přístrojem EXFO FTB-200 s modulem EXFO FTB-5700 pro měření PMD.

Pro automatizovaná měření na reálné optické trase jsme do automatizovaného programu zadávali vstupní parametry pro dlouhodobé měření jako je čas začátku a ukončení měření. Po skončení měření automatizovaný program importoval výsledky z měřícího přístroje EXFO do souborů CSV a HTML. Jelikož je v tomto měření důležitá také okolní teplota, byly využity ještě údaje o teplotě z meteorologické stanice.

Pro měření hodnot PMD vzniklé vlivem mechanického namáhání jsou vytvořeny scénáře pro jednotlivé druhy namáhání.

5.1 Měřicí soustava

Automatizované měření reálné trasy bylo prováděno měřícím přístrojem EXFO FTB-200. Pro měření PMD je do tohoto měřícího systému přidán měřicí modul EXFO FTB-5700. viz. Obr.5.1.



Obr. 5.1: Měřicí systém EXFO FTB-200 [15]

Měřicí systém EXFO FTB-200 umožňuje s využitím Fresnelova odrazu na konci vlákna jednoduché, rychlé a přesné měření po celou délku vlákna. Měřicí systém umožňuje měření optických kabelů až do délky 120 km a měří jak chromatickou tak

Tab. 5.1: Tolerance PMD pro systém EXFO FTB-200

| Tolerance PMD | | | |
|----------------------|--------------|--------------|---------------|
| Typ služby | 100GBASE-LR4 | 100GBASE-ER4 | 100 GBASE-ER4 |
| Provozní vzdál. [km] | 10 | 30 | 40 |
| DGD_max [ps] | 8 | 10,3 | 10,3 |
| PMD_max [ps] | 2,5 | 3,2 | 3,2 |

polarizační vidovou disperzi. V tabulce 5.1 jsou uvedeny tolerance PMD pro tento měřicí systém.[15]

5.2 Zápis výsledku měření do CSV souborů

Po skončení měření automatizovaný program zapíše přehledně výsledky do CSV souborů. V tomto souboru po otevření najdeme údaje jako je datum a čas, hodnoty chromatické disperze a hodnoty PMD.

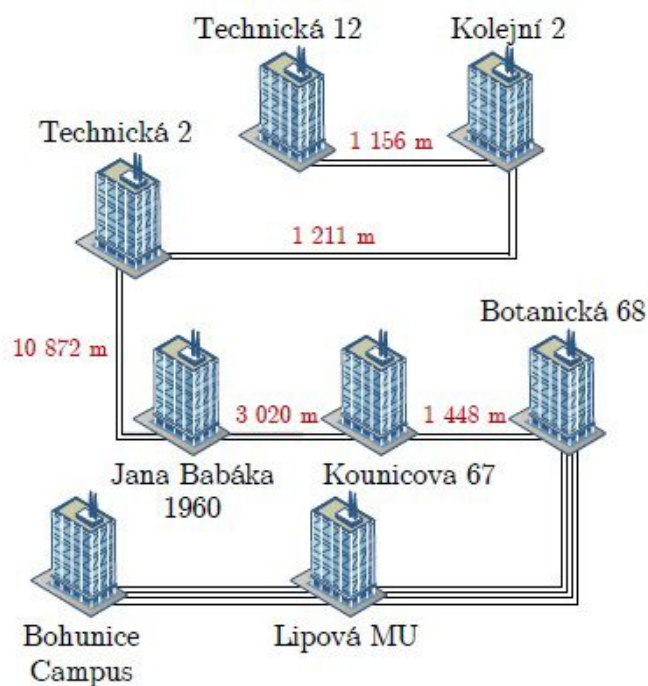
Pro potřeby zjištění teploty pro určení závislosti jsme využívali internetovou stránku meteorologické stanice VUT <http://tubo.fce.vutbr.cz/new/meteoExport.asp>. Zde se po zadání času měření kdy bylo měření realizováno a následného potvrzení vypíše chtěné teploty do souboru CSV, stejně jako u výsledku měření hodnot PMD pomocí přístroje EXFO. Tento soubor obsahuje datum a hodnoty teplot pro jednotlivé časy.

5.3 Měření reálné trasy Technická 12-Campus Bohunice

Začátek měření trasy se nachází na Technické 12 v Brně. Optická vlákna vedou venkovním prostředím přes ulici Botanickou až po Campus v městské části Bohunice. Optická vlákna jsou uložena v takové hloubce aby nedocházelo k promrzání. V trase jsou využívány dva typy vláken a délka měřené trasy je celkem 58 km. Schéma měřené trasy vidíme na Obr.5.2.

5.4 Výsledky automatizovaného měření reálné trasy

V následujících podkapitolách je popis sérií tří scénářů pro dlouhodobá automatizovaná měření reálné trasy Technická 12-Campus Bohunice.



Obr. 5.2: Schéma trasy Technická 12-Campus Bohunice

5.4.1 První scénář

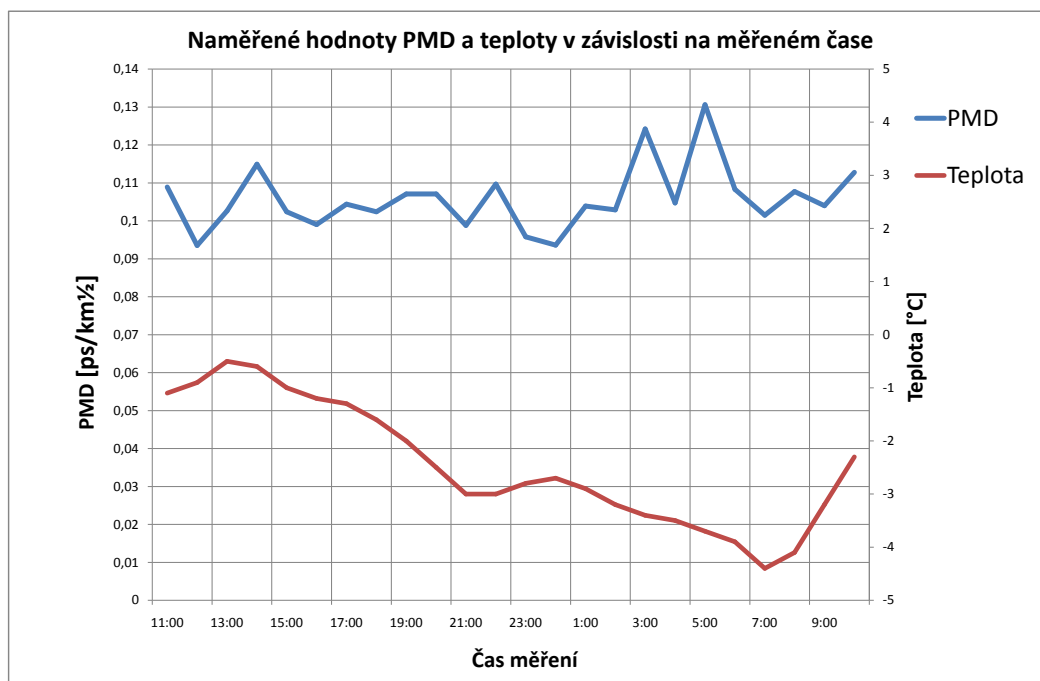
Měření pro první scénář bylo prováděno v prosinci při teplotách lehce pod bodem mrazu. V tabulce 5.2 vidíme parametry provedeného měření včetně maximální a minimální teploty a maximálních a minimálních hodnot PMD, které byly při tomto měření zjištěny. Graf naměřených hodnot vidíme na Obr.5.3.

V příloženém grafu můžeme vidět, že závislost polarizační vidové disperze na jednotlivých hodinách se různě mění. Nedá se taky z grafu a naměřených hodnot přímo odvodit jakým způsobem velikost PMD zkreslení závisí na okolní teplotě. Největší hodnota byla naměřena dne 6.12.2016 v 6:05 ráno, hodnota v tu chvíli byla 0,1306

Tab. 5.2: Naměřené hodnoty PMD pro první scénář

| Hodnoty PMD naměřené pro první scénář | |
|---------------------------------------|-----------|
| Start měření | 5.12.2016 |
| Konec měření | 6.12.2016 |
| Maximální teplota [°C] | -0,5 |
| Minimální teplota [°C] | -4,5 |
| Maximální PMD [ps/ \sqrt{km}] | 0,1306 |
| Minimální PMD [ps/ \sqrt{km}] | 0,0935 |

$[ps/\sqrt{km}]$ při teplotě $-4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naopak nejvyšší hodnota byla $0,0935\text{ }[ps/\sqrt{km}]$ dne 5.12.2016 ve 12:05 při teplotě okolí $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hodnoty PMD mohou být ovlivněny nejen teplotou, ale také i různými vibracemi optického vlákna nebo změně tlaku na vlákno.



Obr. 5.3: Graf PMD a teploty v závislosti na čase měření pro první scénář

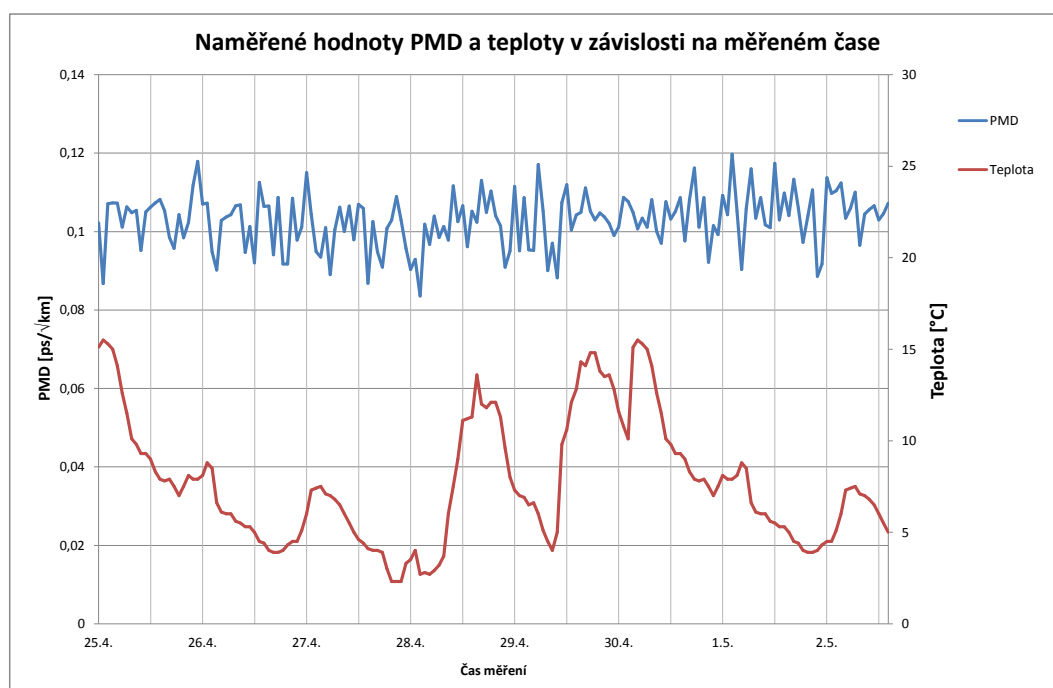
5.4.2 Druhý scénář

Automatické měření hodnot pro druhý scénář bylo prováděno na přelomu dubna a května, kdy se teploty pohybovaly od 2 do $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mezní hodnoty tohoto měření vidíme v tabulce 5.3. Z následujícího grafu, který vidíme na Obr.5.4 můžeme vypočítat velké výkyvy měřených hodnot PMD. Z grafu vidíme, že nejvyšší hodnota PMD $0,1197\text{ }[ps/\sqrt{km}]$ byla naměřena při teplotě $8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ dne 1.5. v 18:30 večer. Naopak nejnižší hodnota $0,0867\text{ }[ps/\sqrt{km}]$ byla naměřena při teplotě $15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z výsledků měření tedy vidíme, že při nižší teplotě byla hodnota PMD vyšší. Nemůžeme však zcela jednoznačně určit závislost PMD na teplotě, jelikož i při nižších teplotách byla

Tab. 5.3: Naměřené hodnoty PMD pro druhý scénář

| Hodnoty PMD naměřené pro druhý scénář | |
|--|-----------|
| Start měření | 25.4.2017 |
| Konec měření | 2.5.2017 |
| Maximální teplota [°C] | 16.6 |
| Minimální teplota [°C] | 2,7 |
| Maximální PMD [$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$] | 0,1197 |
| Minimální PMD [$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$] | 0,0867 |

hodnota PMD nižší než výše zmíněná. Pokud naměřené hodnoty druhého scénáře srovnáme s hodnotami scénáře prvního můžeme vidět, že hodnoty PMD pod bodem mrazu jsou vyšší. Proto se dá říci, že při zvyšující se teplotě se nám snižuje hodnota PMD. Hodnota PMD však mohla být kvůli velkým výkyvům teplot v průběhu měření ovlivněna okolními vlivy prostředí.



Obr. 5.4: Graf PMD a teploty v závislosti na čase měření pro druhý scénář

Tab. 5.4: Naměřené hodnoty PMD pro třetí scénář

| Hodnoty PMD naměřené pro třetí scénář | |
|--|-----------|
| Start měření | 17.5.2017 |
| Konec měření | 18.5.2017 |
| Maximální teplota [°C] | 24,1 |
| Minimální teplota [°C] | 10 |
| Maximální PMD [ps/\sqrt{km}] | 0,1125 |
| Minimální PMD [ps/\sqrt{km}] | 0,0818 |

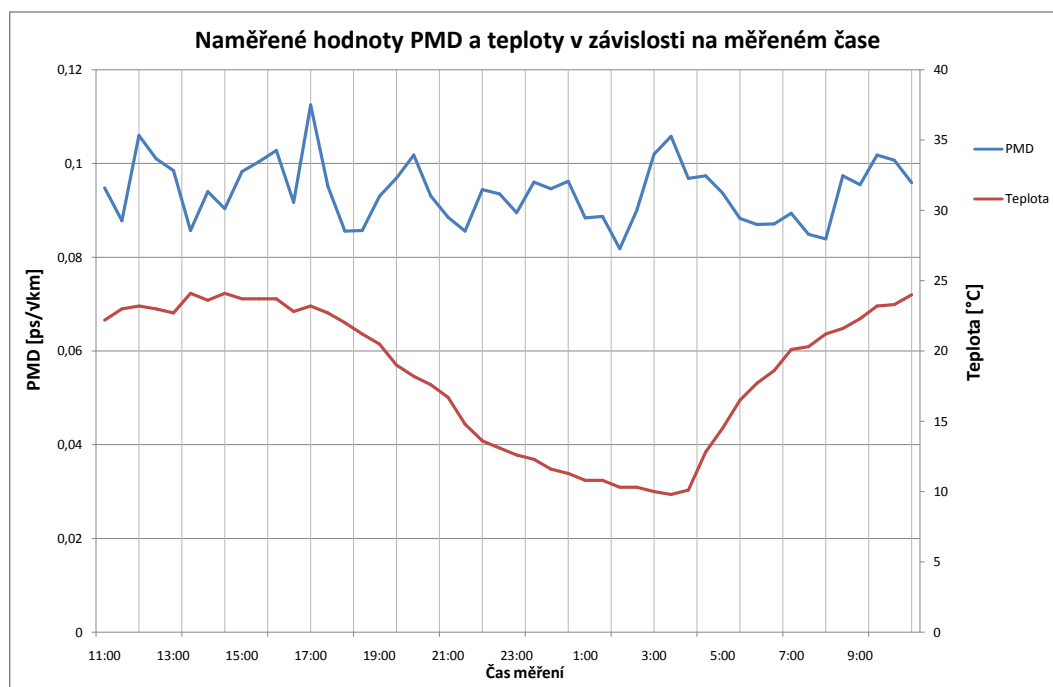
5.4.3 Třetí scénář

Třetí náměr hodnot reálné trasy byl prováděn v rámci 24h v květnu při teplotách kolem 20 °C. Mezní hodnoty tohoto měření opět vidíme v tabulce 5.4.

Graf naměřených hodnot pro třetí scénář, který vidíme na Obr.5.6 se nám značně podobá grafu prvního scénáře. Opět můžeme vidět velké výkyvy v hodnotách PMD. Nejvyšší hodnota PMD 0,1125 [ps/\sqrt{km}] byla naměřena při teplotě 23,2 °C. Nejnižší hodnotu PMD 0,0818 [ps/\sqrt{km}] můžeme v grafu vidět u teploty 10,3 °C. Z těchto zjištěných hodnot vyplývá, že při vyšších teplotách kolem 20 °C se nám oproti prvnímu scénáři při teplotách pod bodem mrazu hodnota PMD nedostala na hodnoty přes 0,1125 [ps/\sqrt{km}]. Avšak z hodnot také vidíme, že i když teplota klesla k 10 °C byla zjištěna menší hodnota PMD než při vyšších teplotách.

5.4.4 Zhodnocení dlouhodobého měření

Ze všech třech náměrů vidíme, že hodnoty PMD se při různých teplotách různě měnili a nejde tedy zcela jednoznačně určit závislost PMD na teplotě. Ze scénářů pouze vidíme, že při ustálené teplotě nad bodem mrazu není hodnota PMD tak vysoká jako při teplotách pod bodem mrazu. Výkyvy hodnot mohou být způsobeny nejen teplotou, ale i dalšími vnějšími vlivy ovlivňující hodnotu PMD. Všechny naměřené hodnoty však splňují limitní hodnoty PMD.

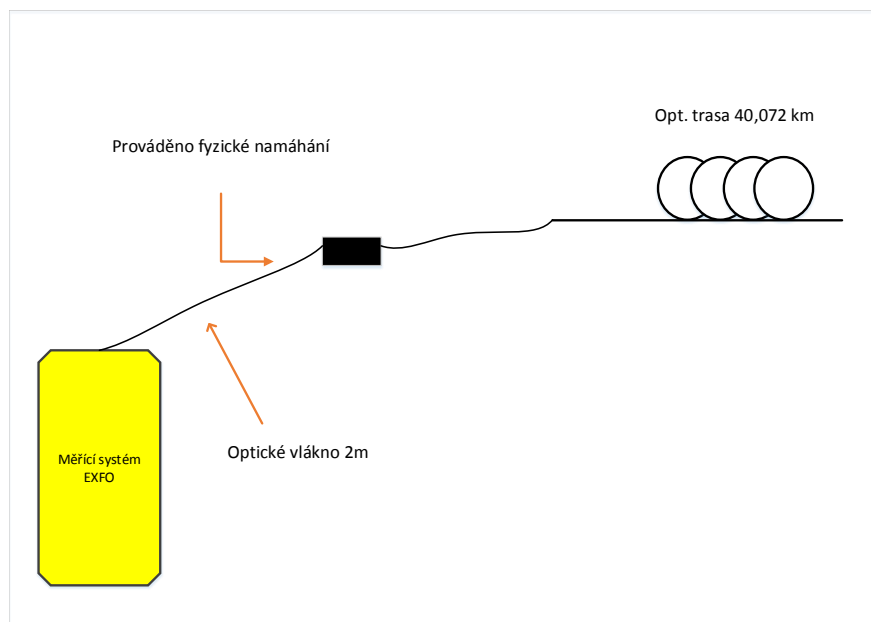


Obr. 5.5: Graf PMD a teploty v závislosti na čase měření pro třetí scénář

5.5 Návrh scénářů mechanického namáhání optického vlákna

Mechanickému namáhání optického vlákna můžeme rozumět jako vlivům které působí na optické vlákno z venku. Mohou vznikat špatným zacházením s optickým vláknem při pokládání do trasy. Optické vlákno může v tomto případě podléhat např. kroucením, ohybem nebo tlakem na vlákno. Pro potřeby měření je v sérii tří scénářů navrženo testování těchto mechanických namáhání na optické vlákno pro zjištění vlivu na velikost hodnoty PMD.

Měření bylo prováděno pomocí dvou optických vláken. První optické vlákno o délce 2m bylo jedním koncem připojeno na měřicí systém EXFO. Na tomto vlákně bylo prováděno jednotlivé namáhání. Druhý konec vlákna byl přes spojku napojen na vlákno o délce 40,072 km. Měřené optické vlákno bylo typu G.652 NDSF. Měření probíhalo v laboratoři za konstantní teploty, která činila 22 °C. Pro každý scénář byly provedeny tři náměry hodnot PMD a poté byly tyto hodnoty zprůměrovány. Schéma měřicí soustavy vidíme na Obr.5.6.



Obr. 5.6: Schéma měřicí soustavy

Tab. 5.5: Naměřené hodnoty PMD pro klidový stav vlákna

| Hodnoty PMD naměřené pro klidový stav vlákna | |
|---|--------|
| Teplota [°C] | 22 |
| Koeficient PMD [$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$] | 0,0498 |
| PMD [ps] | 0,32 |

5.5.1 Klidový stav vlákna

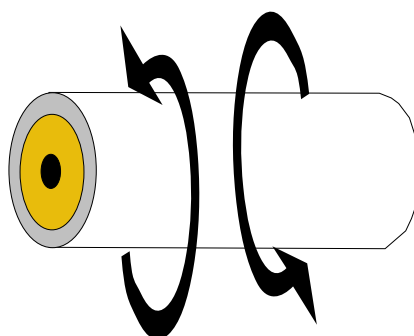
Před měřením jednotlivých scénářů fyzického namáhání byl pro srovnání proveden náměr hodnot PMD za klidového stavu vlákna. Tyto hodnoty můžeme vidět v tabulce 5.5.

5.5.2 První scénář

Náměr pro první scénář byl prováděn pro různé kroucení vláknem. Nejprve byl proveden náměr hodnoty PMD pro jedno překroucení optického vlákna, vidíme na Obr.5.7. Druhý náměr byl proveden při více násobném překroucení optického vlákna. Naměřené hodnoty pro první scénář vidíme v tabulce 5.6 Z této tabulky vidíme, že při vícenásobném překroucení optického vlákna se nám zvětšila hodnota PMD. Došlo tedy k větší deformaci vlákna než při jednom zkroutení. Pokud oba tyto náměry srovnáme s klidovým stavem, můžeme vidět, že hodnota PMD je pro deformaci vlákna překroucením lehce vyšší a dostala se až na hodnotu $0,0598 \text{ [ps}/\sqrt{\text{km}}]$.

Tab. 5.6: Naměřené hodnoty PMD pro překroucení vlákna

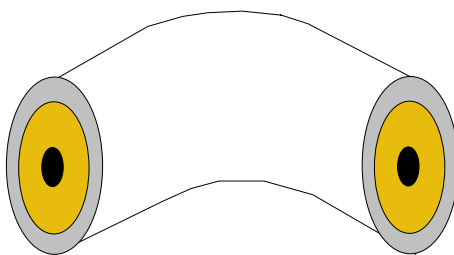
| Hodnoty PMD naměřené pro překroucení vlákna | |
|---|--------|
| Teplota [°C] | 22 |
| Jedno překroucení | |
| Koeficient PMD [$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$] | 0,0564 |
| PMD [ps] | 0,36 |
| Více-násobné překroucení | |
| Koeficient PMD [$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$] | 0,0598 |
| PMD [ps] | 0,39 |



Obr. 5.7: Překroucení optického vlákna

5.5.3 Druhý scénář

Ve druhém scénáři bylo měřeno mechanické namáhání důsledkem ohybu optického vlákna a jeho vliv na výslednou hodnotu PMD. Ohyb vlákna vidíme na Obr.5.8. Jelikož různý ohyb vlákna může mít různý vliv na výslednou hodnotu PMD, byl jeden typ ohybu dodržen po celou dobu měření. Vliv namáhání v důsledku ohybu na hodnotu PMD můžeme vidět v tabulce 5.7. Opět pokud srovnáme výslednou hodnotu PMD s klidovým stavem vidíme, že ohyb vlákna má také určitý vliv na hodnotu PMD. Pokud by však došlo k většímu ohybu, nebo dokonce ke zlomení, nebylo by možné přes vlákno v důsledku deformace přenášet jakékoliv data.



Obr. 5.8: Ohyb vlákna

Tab. 5.7: Naměřené hodnoty PMD pro ohyb vlákna

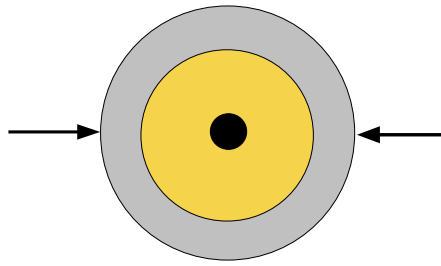
| Hodnoty PMD naměřené pro ohyb vlákna | |
|---|--------|
| Teplota [°C] | 22 |
| Koeficient PMD [$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$] | 0,0531 |
| PMD [ps] | 0,34 |

5.5.4 Třetí scénář

Náměr ve třetím scénáři byl prováděn pro optické vlákno na které byl vyvíjen určitý tlak, vidíme na Obr.5.9. Jelikož hodnota PMD může s různou silou stlačení kolísat, měření bylo prováděno při jedné velikosti tlaku na vlákno po celou dobu měření. Naměřené hodnoty vidíme v tabulce 5.8. Z naměřených hodnot vidíme, že namáhání v důsledku tlaku na vlákno nám oproti klidovému stavu opět zvýšilo hodnotu PMD na $0,0559 [\text{ps}/\sqrt{\text{km}}]$ oproti $0,0498 [\text{ps}/\sqrt{\text{km}}]$. Lze tedy konstatovat stejně jako v předchozích případech, že tlak na vlákno může způsobovat zvýšení hodnoty PMD.

Tab. 5.8: Naměřené hodnoty PMD pro tlak na vlákno

| Hodnoty PMD naměřené pro tlak na vlákno | |
|---|--------|
| Teplota [°C] | 22 |
| Koeficient PMD [$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$] | 0,0559 |
| PMD [ps] | 0,34 |



Obr. 5.9: Tlak na optické vlákno

5.5.5 Zhodnocení měření za fyzického namáhání

Ze všech třech scénářů měření hodnot PMD při různých stavech fyzického namáhání je patrné, že při jakémkoliv namáhání se PMD koeficient nepatrně zvýšil. Za klidového stavu byl koeficient PMD $0,0498 [ps/\sqrt{km}]$.

Nejviditelnějším zvýšením koeficientu PMD oproti klidovému stavu jsou hodnoty při vícenásobných zkrutech na optickém vlákně, kdy hodnota PMD dosahovala $0,06 [ps/\sqrt{km}]$. Všechny ostatní naměřené hodnoty se pohybovali mezi touto hodnotou a hodnotou za klidového stavu. Všechny naměřené hodnoty se však od sebe liší pouze v setinách procent. Hodnoty také splňují limitní parametry koeficientu PMD. Pokud tedy nedochází k velkým mechanickým poškozením kabelů, jako může být například zlomení, přeseknutí kabelu apod. nedojde k výraznému zpomalení nebo výpadku přenosu paprsku šířící se optickým vlnovodem.

6 ZÁVĚR

Bakalářská práce je zaměřena na obecný popis principu optických vláken a jejich druhů. Především se však práce zabývá seznámením s problematikou polarizační vidové disperze - PMD, která je v posledních letech jedním s největších problémů při vysokorychlostních přenosech přes optické vlákno. V práci je provedeno jak dlouhodobé měření reálné trasy tak i návrh scénářů pro krátkodobá měření v laboratoři. Bakalářská práce je zaměřena na obecný popis principu optických vláken a jejich druhů. Především se však práce zabývá seznámením s problematikou polarizační vidové disperze - PMD, která je v posledních letech jedním s největších problémů při vysokorychlostních přenosech přes optické vlákno. V práci je provedeno jak dlouhodobé měření reálné trasy tak i návrh scénářů pro krátkodobá měření v laboratoři.

V teoretické části této práce je proveden podrobný popis problematiky polarizační vidové disperze, její vznik a vlivy ovlivňující zkreslení PMD. Dále je uveden podrobný popis jednotlivých metod pro měření a zjištění parametru PMD na optických trasách. Všechny metody měření jsou vhodně doplněny schémata zapojení. Dále jsou popsány metody kompenzace PMD, jako může být optická, optoelektronická a elektronická metoda. Tyto metody jsou taktéž doplněny blokovými schémata.

Praktická část bakalářské práce se věnuje popisu měřicí soustavy EXFO FTB-200 s modulem FTB-5700, která byla pro toto měření použita. Dále je zde popsána trasa Technická 12 - Campus Bohunice pro dlouhodobá měření, včetně schématu trasy jejíž délka dosahuje 58 km.

V další části praktického měření jsou uskutečněny měření výše zmíněné reálné trasy. Toto měření bylo rozděleno do třech scénářů pro různou časovou dobu a teplotu okolí. Scénář prvního měření byl uskutečněn při venkovních teplotách těsně pod bodem mrazu. Toto měření trvalo 24 hodin, kdy se hodnota PMD v tomto časovém období pohybovala v rozmezí $0,0935 - 0,1306 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ v rozmezí teplot $-0,5 - -4,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Z výsledného grafu pak můžeme vypočítávat nestálost hodnoty PMD v čase měření. Tato nestálost může být způsobena různými vlivy, ať už teplotou nebo vibracemi v okolí vlákna.

Náměr pro druhý scénář probíhal v rámci jednoho týdne za výrazných výkyvů teplot ovzduší, kdy se teplota pohybovala ve škále od 2 do $17 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Z přiloženého grafu můžeme opět vypočítávat velké výkyvy naměřených hodnot PMD, které mohou být způsobeny právě velkými výkyvy teploty ovzduší. Hodnota PMD se v tomto období pohybovala od $0,0867$ po $0,1197 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Z těchto hodnot můžeme vidět, že při vyšší teplotě nad bodem mrazu hodnoty PMD nedosahují takové velikosti jako hodnoty v prvním scénáři. Dá se tedy říci, že při zvyšující se teplotě se nám snižuje hodnota PMD. Hodnota PMD však stejně jako v prvním případě mohla být ovlivněna kvůli velkým výkyvům teplot v průběhu měření okolními vlivy prostředí.

Třetí dlouhodobé měření probíhalo za teplot kolem 20 °C v průběhu 24h. Naměřené hodnoty PMD se pohybovaly v rozmezí 0,0818 - 0,1125 ps/\sqrt{km} . Z grafu stejně jako z předešlých případů vyplývají velké výkyvy hodnot PMD. Pokud však opět srovnáme s předchozími scénáři, dá se říci, že při vyšší teplotě kolem 20 °C se nám hodnoty PMD opět snížily. Avšak z grafu také vidíme, že i když teplota klesla k 10 °C byla zjištěna menší hodnota PMD než při vyšších teplotách.

Ze všech tří scénářů vidíme spíše náhodnou změnu PMD proto nejde zcela jednoznačně určit závislost na teplotě. Ze scénářů můžeme pouze vypožorovat, že při ustálené teplotě nad bodem mrazu není hodnota PMD tak vysoká jako pod bodem mrazu. Všechny naměřené hodnoty však splňují limitní hodnoty PMD.

V další části měření bylo navrženo měření tří scénářů mechanického namáhání a to překroucení optického vlákna, ohyb vlákna a tlak na optické vlákno. Nejdříve se v této kapitole seznamujeme jak měření probíhalo, včetně doplnění vhodným schématem zapojení. Před vlastním měření tří scénářů proběhl náměr za klidového stavu optického vlákna, kdy nebylo vlákno nijak namáháno. Všechno měření probíhalo za konstantní teploty 22 °C a hodnota PMD při klidovém stavu vlákna byla 0,0498 ps/\sqrt{km} .

V prvním scénáři mechanického namáhání optického vlákna překroucením nám při více násobném překroucení optického kabelu byla naměřena vyšší hodnota PMD než při jednom překroucení vlákna a to 0,0598 ps/\sqrt{km} oproti 0,0564 ps/\sqrt{km} . Náměr pro druhý scénář probíhal při deformaci vlákna ohybem. V důsledku možných výkyvů hodnot při různých druzích ohybu je toto měření realizováno pro jeden typ ohybu. Optické vlákno bylo ohnuto do úhlu 10°. Pokud výslednou hodnotu 0,0531 ps/\sqrt{km} srovnáme opět s klidovým stavem vidíme, že ohyb vlákna má také určitý vliv na hodnotu PMD. Pokud však dojde k většímu ohybu nebo dokonce ke zlomení vlákna, dojde k velké deformaci a nelze přes vlákno přenášet jakákoliv data. Náměr ve třetím scénáři byl prováděn pro optické vlákno, na které byl vyvíjen určitý tlak. Opět jako v předešlém případě může hodnota PMD z různou velikostí tlaku různě kolísat, proto byl na vlákno po celou dobu měření vyvinut stejný tlak. Z naměřených hodnot můžeme opět vypožorovat zvýšení hodnoty PMD oproti klidovému stavu a to na hodnotu 0,0559 ps/\sqrt{km} . Lze tedy konstatovat, že tlak na vlákno může zvyšovat výslednou hodnotu PMD.

Jelikož všechny naměřené hodnoty splňovali limitní hodnoty PMD ze všech tří scénářů tedy vidíme, že pokud nedojde k velkému poškození optického kabelu, jako je zlomení nebo přeseknutí kabelu, nedojde k výraznému zpomalení přenosu paprsku šířící se optickým vlnovodem.

LITERATURA

- [1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: M. Filka, 2009. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] DADO, Milan. *Kapitoly z optiky: pre technikov*. 1. vyd. Žilina: EDIS, 1998. ISBN 80-710-0390-5.
- [3] POWERS, Peter E. *Fundamentals of nonlinear optics*. 2011. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 14-200-9351-7.
- [4] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky*. Vyd. 1. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN 80-858-6312-X.
- [5] COLIN, Y. Optical Fiber Loss and Attenuation. In: *Fiberoptics4sale* [online]. 2010 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/optical-fiber-loss-and-attenuation/>.
- [6] URBAN, F. a B. MIKEL. *Optoelektronika a optické komunikace: Skriptum*. 2003. BRNO: VUT FEKT, 2003.
- [7] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *Měření chromatické a polarizační vidové disperze jednovíkových optických vláken*. [online]. In: . Webové stránky Mikrokom, 2002, s. 6 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/CD-PMDcablex2002.pdf>
- [8] ŤUPA, M., M. FILKA a O. DOSTÁL. *Polarizační vidová disperze - PMD* [online]. Elektrověue - Internetový časopis, 2012 [cit. 2016-10-26]. ISSN 1213- 1539. Dostupné z: <http://www.elektrověue.cz/cz/download/polarizacni-vidova-disperze—pmd/>
- [9] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *NOVÁ METODA MĚŘENÍ PMD OPTICKÝCH KABELOVÝCH TRAS* [online]. MIKROKOM s.r.o., 2007 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/pmd-mereni-tras.pdf>
- [10] MENYUK, Curtis R. a Andrea. GALTAROSSA. *Polarization mode dispersion*. 2005. New York, N.Y.: Springer, c2005. ISBN 978-038-7231-938.
- [11] LIETAERT, Gregory. *Testing Polarization Mode Dispersion (PMD) in the Field* [online]. In: . 2007, s. 1-14 [cit. 2016-10-27]. Dostupné z: http://www.fiberoptic.com/fiber_characterization/pdf/fom_field_testing_pmd.pdf

- [12] SEWTER, Jonathan. *ELECTRONIC EQUALIZATION OF POLARIZATION-MODE DISPERSION IN 40-GB/S OPTICAL SYSTEMS*. Toronto: University of Toronto, 2005.
- [13] DUBSKÝ, P. a M. KUCHARSKI. *Měření přenosový parametrů optických vláken, kabelů a tras*. [online]. In: . Mikrokom, 2001 [cit. 2016-10-28].
- [14] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *POTDR - LOKALIZACE ÚSEKŮ SE ZVÝŠENOU HODNOTOU PMD V OPTICKÝCH TRASÁCH* [online]. In: . Mikrokom, 2006, s. 1-3 [cit. 2016-10-29]. Dostupné z: <http://www.mikrokom.eu/skoleni/pdf/potdr.pdf>
- [15] *Profiber: PROFiber Networking CZ s.r.o.* [online]. [cit. 2016-12-9]. Dostupné z: <http://www.profiber.eu/>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | |
|---------------|--|
| n | index lomu |
| P | elektrická polarizace |
| ε | permitivita vakua |
| χ | dielektrická susceptibilita |
| E | intenzita elektrického pole |
| α | měrný útlum |
| λ | vlnová délka |
| A | útlum |
| L | délka vlákna |
| PMD | polarizační vidová disperze - Polarization Mode Disperzion |
| V | normalizovaná frekvence |
| WDM | vlnový multiplex - Wavelength Division Multiplex |
| ITU | mezinárodní telekomunikační unie - International Telecommunication Union |
| DSF | disperzní posunuté vlákno - Disperzion Shifted Fiber |
| PSP | model polarizačních os - Principal States of Polarization |
| DGD | zpoždění impulzu vlivem polarizace - Differential Group Delay |
| S_a | polarizační vektor |
| J | Jonesův vektor |
| T | matice Jonesova vektoru |
| L_c | korelační délka |
| L_b | vzdálenost šíření |
| δ_n | vzdálenost šíření |
| TINTY | tradiční interferometrická metoda měření PMD |

| | |
|--------------|---|
| $\Delta\tau$ | maximální PMD zpoždění |
| ω | úhlový optický kmitočet |
| LED | světlo emitující diody - Light Emitting Diode |
| GINTY | všeobecná interferometrická metoda měření PMD |
| PBS | polarizační dělič - Polarizing beam splitter |
| T_B | bitová délka |
| $P(\delta)$ | spektrální závislost výkonu |
| k | koeficient vazby vidů |
| c | rychlost šíření světla ve vakuu |
| P-OTDR | polarizační optický reflektometr v časové oblasti - Polarization Optical Time Domain Reflectometr |
| β | velikost dvojlomu ve vláknu |
| h | vazební délka mezi polarizačními vidy |
| SOP | změna stavu polarizace - State of Polarization |
| DOP | stupeň polarizace - Degree of Polarization |
| EDFA | optický předzesilovač - Erbium-Doped Fiber Amplifier |
| BER | bitová chybovost - Bit Error Rate |
| DFB | distribuční zpětnovazební laser - Distributed feedback laser |
| DOF | stupeň volnosti - Degree of Freedom |
| PC | polarizační kontrolér - Polarization Controller |
| PMF | vlákno s identickou polarizací - Polarization maintaining fiber |
| CD | chromatická disperze - Chromatic Dispersion |
| SNR | odstup signálu od šumu - Signal to Noise Ratio |
| QPSK | kvadrurní fázová digitální modulace - Quadrature Phase Shift Keying |

| | |
|------|--|
| OTDR | optický reflektometr v časové oblasti - Optical Time Domain Reflectometer |
| INTY | interferometrická metoda měření PMD |
| FEC | metoda zjišťování a opravy chyb vzniklých při přenosu - Forward Error Correction |
| DSF | disperzně posunuté vlákno - Dispersion Shifted Fiber |

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého DVD

58

A OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD

Přiložené DVD obsahuje všechny potřebné dokumenty bakalářské práce. Na DVD je obsažena elektronická verze bakalářské práce ve složce Hlavní dokument. V dalších složkách najdeme jednotlivé náměry automatických měření reálné trasy a měření mechanického namáhání optického kabelu. V poslední složce najdeme všechny grafy obsažené v práci.